

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра інтегрованих технологій машинобудування

«На правах рукопису»
УДК 621.91

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ В.А. Пасічник
(підпис)
“ __ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 133 – Галузеве машинобудування (інженерний дизайн)
(код і назва)

на тему: Стенд для механічного трансформування 3D об'єктів

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи МІ-72мп
(шифр групи)

_____ Костище Євген Сергійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н. Солодкий В.І. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра інтегрованих технологій машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування (інженерний дизайн)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ В.А. Пасічник
(підпис)

«__» _____ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Костище Євген Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема дисертації Стенд для механічного трансформування 3D об'єктів _____,

науковий керівник дисертації Солодкий В.І., доцент, к.т.н. _____ .
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № ____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Стенд для механічно трансформування 3D об'єктів

4. Предмет дослідження Конструкторське та технологічне забезпечення
стенду для механічного трансформування 3D об'єктів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити На основі аналізу ринку й наявних технічних рішень стенду для трансформування 3D об'єктів розробити нове концептуальне рішення, розробити дизайн екстер'єру та компоновку стенду для копіювання та визначити його основні функціональні й технічні характеристики ", створити й дослідити макет вузла стенду, підготувати пропозицію стартап-проекту для ринку стендів та верстатів для трансформування.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Виготовлення макету в масштабі 1:3, підготовка презентації. _____

7. Орієнтовний перелік публікацій Теза доповіді на наукових конференціях за темою дослідження.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 1.09.2017 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Сучасний стан та перспективи розвитку Копіювально-фрезерних стендів	1.10.2017	
2	Теоретичне обґрунтування та розрахунки проектних параметрів	1.001.2018	
3	Технологічне забезпечення виготовлення макету	1.04.2018	
4	Розроблення стартап-проекту	1.08.2018	
5	Підготовка презентації, оформлення роботи	10.12.2018	

Студент

(підпис)

Косище Є.С.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Солодкий В.І
(ініціали, прізвище)

*Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

АННОТАЦІЯ

Костище Є.С. Стенд для механічного трансформування 3D об'єктів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування (інженерний дизайн). Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2018.

На основі дослідів ведучих приладів, що займають ведуче місце в галузі ручного дублювання та оброблення деревини, в рамках дисертації ведеться дослідження по вдосконаленню та автоматизації складних рухів обробки ручного спрямування.

В процесі роботи було спроектовано прототип стану, оптимізований під роботу у напівавтоматичному режимі. Розрахована силове навантаження на всі вузли стану, та проведена симуляція навантажень.

Виготовлений у масштабі 1:3, макет вузла головного руху стану, що містить у собі деталі з проведеною топологічною оптимізацією складальних одиниць.

Ключові слова : інженерний дизайн, проектування, силовий аналіз, динамічний аналіз, стан для трансформування, деревообробка, інструмент, топологічна оптимізація.

ANNOTATION

Kostyshe E.S. Installation for 3D`s objects, mechanical transformation

Thesis for a Master's degree in specialty 133 - Sectoral engineering (engineering design). National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". - Kyiv, 2018.

On the basis of researches of leading devices occupying the leading place in the field of manual duplication and processing of wood, in the framework of the dissertation is a research on the perfection and automation of complex movements of manual processing.

In the process of work, a prototype of the stand was designed, optimized for work in semi-automatic mode. The power load is calculated for all nodes of the stand, and the load simulation is carried out.

Made on a scale of 1: 3, the layout of the node of the main motion of the stand, which includes parts with the topological optimization of assembly units.

Key words: engineering design, design, power analysis, dynamic analysis, stand for transformation, woodworking, tool, topological optimization.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему: «Стенд для механічного трансформування 3D об'єктів », містить 81 сторінки пояснювальної записки, рисунків – 82, таблиць – 26, використаних джерел – 24, ілюстрації, що включає 20 слайди презентації графічної частини, 1 макет.

Актуальність

Сучасні методи обробки деревини з метою копіювання вихідних геометричних параметрів шаблону досить різнобічні. Верстати з ЧПК є досить точним та вартісним методом, щодо обробки, але не враховуючи цінність наявності людського фактору під час обробки. У свою чергу більш дешеве ручне, таке, як копіювально-фрезерні верстати, обладнання має потребу в автоматизації.

Створення гібридного стенду, спроектованого з метою збереження якості обробки ручних верстатів та автоматизації верстатів з ЧПК вирішує дану проблему.

Мета дослідження

Підвищення продуктивності відтворення елементів дизайну та виробів з деревини на автоматичному рівні, з функцією збереження ручної обробки. Гібридизація утворених рухів.

Задачі дослідження

1. Аналіз ринку на предмет необхідності використання подібних приладів.
2. Розробка концептуального підходу щодо гібридного копіювально-фрезерного стенду.
3. Проектний розрахунок стенду з урахуванням експлуатаційних вимог.

4. Проектування інструментального забезпечення.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження в рамках дипломного проектування виступає напіваавтоматичний копіювально-фрезерний стенд для відтворення барельєфних поверхонь

Предмет дослідження

Напіваавтоматичний копіювально-фрезерний стенд для відтворення барельєфних поверхонь

Практична новизна

Перший в історії ринку прилад по відтворенню ручної обробки деревини за рахунок гібридного типу переміщення вузлів стенду

Апробація роботи

Виконані концептуальний та проектний розрахунки приладу, необхідні для виготовлення готового протипу.

Ключові слова : інженерний дизайн, проектування, силовий аналіз, динамічний аналіз, стенд для трансформування, деревообробка, інструмент, топологічна оптимізація.

ЗМІСТ

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ.....	13
1.1 Сучасні копіювальні-фрезерні верстати та стенди	13
1.1.1 Копіювальний верстат KPB2545	13
1.1.2 Дуплікарвер рамочний.....	15
1.1.3 Пантограф PantoJIG.....	17
1.1.4 Пантограф Horizontal Mortising Machine (HMM)	19
1.1.5 Копіювальні-фрезерні верстати JET.....	20
1.2 Параметри гібридного стенду	21
1.2.1 Привідна система.....	21
1.2.2 Каркас.....	22
1.2.3 Інструментальне забезпечення.....	22
1.2.4 Точність обробки	22
1.2.5 Якість обробки	22
1.2.6 Ергономічні параметри.....	23
1.2.7 Уніфікованість.....	23
1.3 Інженерні задачі.....	23
1.3.1 Моделювання та розрахунок рамного каркасу	23
1.3.2 Топологічна оптимізація вузлів	24
1.4 Маркетинговий аналіз стартап-проекту	24
1.5 Висновки по розділу	25
2 ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТЕНДУ	25
2.1 Концепція майбутнього виробу.....	25
2.2 Режими різання [5].....	26
2.3 Статичний аналіз.....	31
2.3.1 Статичний лінійний аналіз фундаменту.....	32
2.3.2 Статичний аналіз каркасу виконавчого модуля.....	44
2.4 Динамічний аналіз конструкції.....	45
2.5 Робочий модуль стенду	46

2.6	Механізм ручного керування обертанням столів.....	47
2.7	Лінійні направляючі та елементи переміщення робочої поверхні стенду.....	49
2.8	Розрахунок та вибір приводу головних рухів	55
2.9	Система захисту	61
2.10	Топологічна оптимізація складальної одиниці	63
2.11	Висновки по розділу	67
3	ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКЕТУ ВУЗЛА СТЕНДУ	68
3.1	Локація інструменту.....	68
3.2	Визначення зміни кутових параметрів інструменту	71
3.3	Виготовлення макету вузла обертання столів.....	75
3.4	Вибір технології виготовлення	76
3.5	Результат застосування FDM технології.....	78
3.6	Результат застосування PolyJet друку	79
3.7	Висновки по розділу	81
4	СТАРТАП-ПРОЕКТ	82
4.1	Висновки	91
5	Список використаної літератури	92
6	Додаток А" Партнерська пропозиція"	95
7	Додаток Б " Слайди презентації"	96

ВСТУП

На сьогоднішній день існує велика кількість матеріалів, що використовуються в рамках відтворення та проектування різноманітних дизайнерських рішень, які у свою чергу стали останнім часом все менш наближеними до модернізованого розуміння естетики, інакше кажучи до хай-теку. Все частіше можна побачити рекламні ролики у соціальних сітях, та навіть фрагменти відтворення елементів декору приближених по своєму характеру не інакше, як до античних часів.

Через велику кількість декоративних полімерів та пластів, через тону модернізованих та доступних дешевих матеріалів з початку часів проривається єдиний, що у всіх епохах та поколіннях вважався найзакоренілішим та більш еталонним, коли мова заходить про декорацію оселі, це дерево. Більш канонічного та статусного матеріалу для підкреслення заможності та декоративного смаку не знайти, якщо не брати у огляд благородні метали авжеж.

Які на сьогоднішній день існують шляхи для рішення проблеми обробки деревини, з оглядом на вище описану причину. Найбільш передовим та найбільш точним у цій сфері діяльності є станки з числовим програмним керуванням (ЧПК). На перший погляд їх неперевершеність не дає навіть приводу сумніватися у їх здатності справлятися з будь-якими задачами на високому рівні, і це без суперечок дійсно так. Але у цієї медалі є також і інша сторона, котра говорить о том, що дизайн інтер'єру це річ індивідуальна та масовому і навіть серійному випуску не належить.

Іншими словами використовувати ці технології не дуже раціонально, коли мова заходить о відтворенні якоїсь складної форми у одичній кількості. Та і все ж таки для створення чогось надзвичайного, необхідно

мати фантастичну уяву та талант, до створення моделей тих самих декоративних елементів, не кажучи вже про фінансову забезпеченість підприємства чи окремого суб'єкта, що вирішив займатися деревообробкою. Ще одною досить вагомою причиною відмовитись від використання станків з ЧПК є схильність людини віддавати пріоритет речам, що були зроблені власноруч. Перш за все ручна обробка у всі часи цінувалась більше за машинну, як з фінансової сторони питання так і з естетичної.

Принцип побудови рухів на будь якому верстаті з ЧПК базується на керуванні інструментом по найвигіднішому найкоротшому шляху, без урахування особливостей геометрії та пластики форми, що обробляється, ця особливість представляється в цій роботі, як "дефект" та є основною з причин на думку автора, чому саме втручання людини у такий процес, як створення чергового продукту мистецтва, є необхідним



Фигурка "Мамонт", зліва,- обробка ЧПК, з права, - ручна обробка

Сумніватися в доцільності вище описаного аргументу рівноцінно віддачі переваги надрукованому на лазерному принтері картини видатного художника ніж оригіналу. І дійсно у 21-му столітті не тільки покупець, а й майстер столяр віддає перевагу саме ручній обробці, хоч і намагається різноманітними шляхами полегшити свій шлях. На виході ре-

зультатами праці є нескладна оснастка, що частіш за все допомагає відтворювати якісь важкі геометричні форми, наприклад: вінтові поверхні, ритмічні та метричні барельєфи з високою точністю.

В свій час великим проривом було створення копіювально-фрезерних верстатів, що надавало змогу використовуючи заздалегідь підготовлений копір повторювати його геометрію з урахуванням особливості геометрії кожної окремої моделі. Це займало певний час, набагато довший ніж обробка з використанням ЧПК, але і не включало недоліків, що були оговорені раніше.

Саме по цим причинам, копіювально-фрезерні верстати нікуди не пропали з майстерень всього світу, їх використання є досить актуальним не лише в межах України, а і Німеччині, Росії та Китаю, а різноманітність конструкцій, яку пропонує сучасний ринок дійсно вражає. Розглянемо найсучасніші та найбільш вдалі на думку автора конструкції, підведемо підсумки переваг та недоліків кожної з них.

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Сучасні копіювально-фрезерні верстати та стенди

На просторах сучасного ринку існує велика кількість приладів на-
прямлених на копіювання та трансформування, барельєфної геометрії
різноманітної важкості та масштабів. Кожен з цих верстатів має свої уні-
кальні можливості, що зазвичай суттєво відрізняє їх один від одного. Ця
сепарація надає кожному окремому приладу свої особливості ведення
стратегії обробки, що у свою чергу наділяє прилади певними перевагами
та недоліками. Частина приладів працює виключно у ручному режимі,
інша тільки в автоматичному. Найбільш наближеними до порівняння
прилади є представники таких країн як: Бельгія ,Німеччина, Росія, Ки-
тай. Прилади: KPB2545, Дубликарвер 1, PantoJig, JET, Horizontal Mortising
Machine (НММ).

Згідно задачам поставленими в рамках дипломного проекту по ро-
зробці напівавтоматичного стенду-верстату для копіювання барельєф-
ної геометрії, проведемо аналіз аналогів, що випускаються у серійному
та масовому виробництві.

1.1.1 Копіювальний верстат KPB2545

Верстати серії KPB [1] (рис. 1.1), були розроблені бельгійською
компанією WivaMas, у 2015 році. Верстати призначенні для дублювання
геометрії, шляхом ручного керування інструментарію вздовж напрям-
них приладу. Агрегат націлений на відтворення геометрії по шаблону,
закріпленого у центрах, тобто геометрію котру дублює пристрій е тіла
обертання, або тіла, що мають незначне відхилення геометричної пове-
рхні відносно осі обертання власного тіла.

Поворот деталей навколо осі здійснюється за рахунок цепного з'єднання двох центрів. Перш за все увагу обертає на себе компактність виробу, це настільний варіант, та використовується для відтворення геометрії незначного розміру а саме 200 мм довжина обробки та допустимим діаметром заготовки до обробки 75 мм.

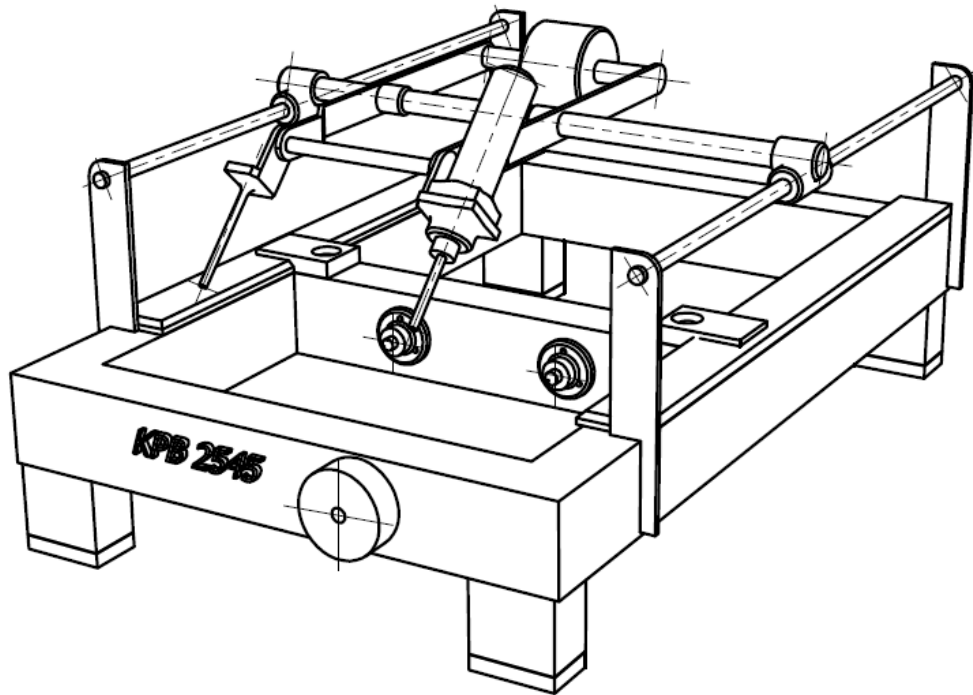


Рис. 1.1 - Верстат KPB2545[1]

Перевагами цієї конструкції є її компактність, легкість складання завдяки використанню стандартизованих профілів, відсутність необхідності зварювання окремих вузлів, що у свою чергу також надає змогу без великих зусиль транспортувати виріб, або знищити його при терміновій необхідності. До переваг також можна віднести стандартизованість направляючих елементів, що при необхідності можуть бути замінені чи пошкоджені без витрати додаткових ресурсів.

Серед недоліків слід відмітити: відсутність будь-якого натяку на комфортність використання та ергономічність, фактично працівник, що не використовує якихось додаткових засобів безпеки не може бути га-

рантовано захищений від уникнення травм під час обробки, чи уникнення браку через відсутність елементів керування процесу.

Під час утворення геометрії та наявності комбінованих водночас до 3-х простих рухів робить процес обробки досить складним. Також до недоліку слід відмітити ненадійність конструкції, а саме використання хоч і стандартизованих направляючих, але фіксованих лише по двох опорах, що у свою чергу може відобразитись на точності обробки, особливо, коли сили різання та положення інструменту по відношенню до направляючої досягнуть свого критичного значення.

Але все одно дивлячись на ці недоліки конструкція має досить велику актуальність, як на території виробника, так і за його межами. Отже, ключові фактори на котрі варто звернути увагу:

- компактність;
- уніфікованість деталей;
- легкість складання, демонтажу та транспортування.

Фактори, яких слід уникати під час проектування пристрою згідно цієї схеми:

- використання нежорстких конструктивних елементів, що у наслідку вплинуть на точність;
- відсутність ергономічної оптимізації.

1.1.2 Дуплікарвер рамочний

Верстати серії дуплікарвер[2] (рис. 1.2) включають до себе різні типи конструкцій та рішень у тому числі тип конструкції, що був розглянутий раніше. Верстат цієї серії націлений на обробку деталей такого ж типу як і попередній, але встановлених у перпендикулярно протилежному напрямку. Він також керується вручну и забезпечує лише три рухи,

що є безумовно достатньою умовою для відтворення будь-якої геометрії в зоні обробки.

Перевагами цієї конфігурації є збільшений доступ до вершини деталі, котра у попередній конструкції була зарезервована під засіб кріплення, та ще більша компактність. Варто відмітити, що цей прототип є на порядок дешевшим за свого попередника, через використання хоч і не стандартних, але менш вартісних елементів конструкції.

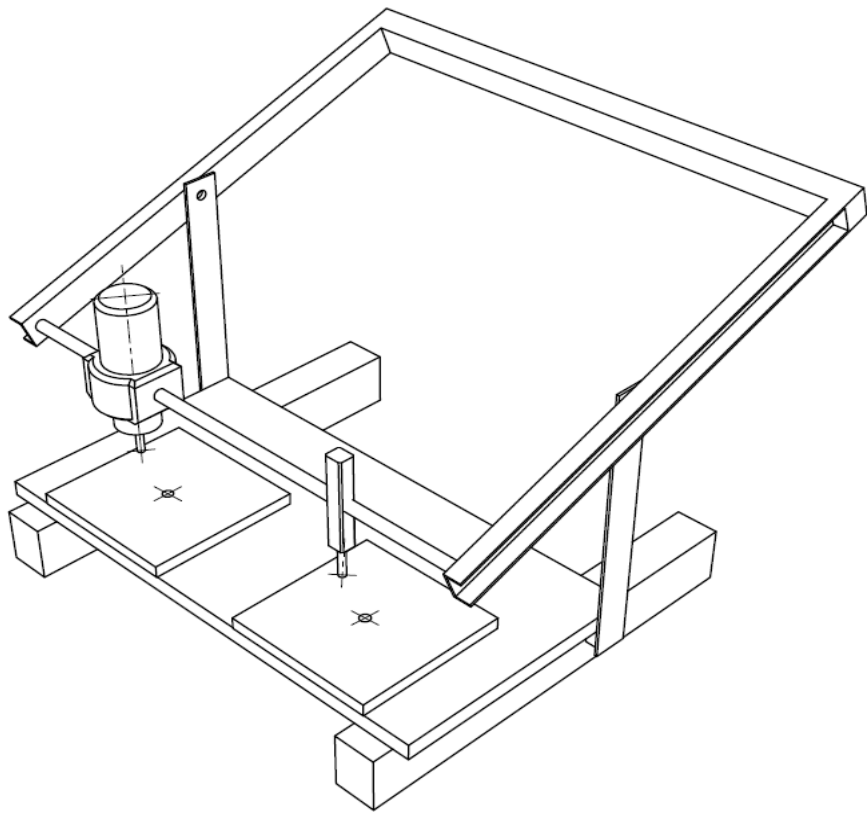


Рис. 1.2 - Дупликарвер рамочний[2]

Особливість конструкції також є і її основним недоліком. Мала жорсткість, що у свою чергу під час критичних навантажень може спричинити не лише брак виробу, а і становити загрозу працівнику, робить цей варіант не досить надійним.

Використання двох валів у послідовному ланцюгу кріплення щупу та приводу інструменту, не забезпечить бажаної точності при обробці, та буде створювати люфт. Кріплення інструмента на валу зафіксованого на

двох опорах також дає привід сумніватися у витримки точності під час обробки.

У якості механізму повороту робочих поверхонь був використаний звичайний гумовий ремінь, котрий хоч і легко замінити з часом, але дуже не бажано використовувати, через відсутність можливості прогнозування його тривалість здатності зберігати власні властивості такі як форму та гнучкість. У разі виникнення дефекту під час обробки, рух що повторюються за веденим буде повторюватись з більшою дискретністю, що приведе до браку та більш різкому зносу інструмента.

Використання зварки та вище перелічені недоліки не робить цю конструкцію оптимальною до використання, та є більш схожим на аматорський продукт ніж на верстат здатний працювати в умовах виробництва. Цей приклад є досить наглядним, щоб зрозуміти які фактори впливають на відсутність доцільності використання даного продукту:

- ненадійність конструкції;
- відсутність ергономічності;
- індивідуалізація каркасних деталей.

1.1.3 Пантограф PantoJIG

Верстат PantoJig[3] (рис. 1.3) є досить цікавим представником сімейства копіювально-фрезерних, але через свою специфічну конструкцію має ряд обмежень. Почнемо з переваг, це самий ергономічний верстат серед тих, що були розглянуті, завдяки обмеженості рухів, для керування використовується лише дві ручки котрими досить легко керувати водночас. Всі деталі без винятку виконані з набору уніфікованих складальних одиниць УСП.

Схема паралельного розміщення столів робить можливість обробляти деталі практично необмеженого розміру саме у площині стола. До

значних особливостей цього приладу слід віднести здатність масштабувати вихідні параметри геометрії шаблонної деталі завдяки використанню простої, але водночас робочої схеми згідно пантографу, що в залежності від відношення відстаней певних ланок може трансформувати, у наслідку, отриману геометрію.

Серед недоліків варто відмітити велику кількість обмежень цього приладу, таку наприклад, як відсутність можливості обробляти несиметричні деталі через специфіку розташування столів, що приводить до відзеркалення отриманої деталі у відмінності від оригіналу - шаблону.

Великий простір до обробки в площині стола компенсується обмеженою висотою обробки, як можна побачити через перераховану кількість недоліків цей прилад більш годиться для отримання симетричного барельєфу незначної глибини, та важкості через досить жорстку конструкцію.

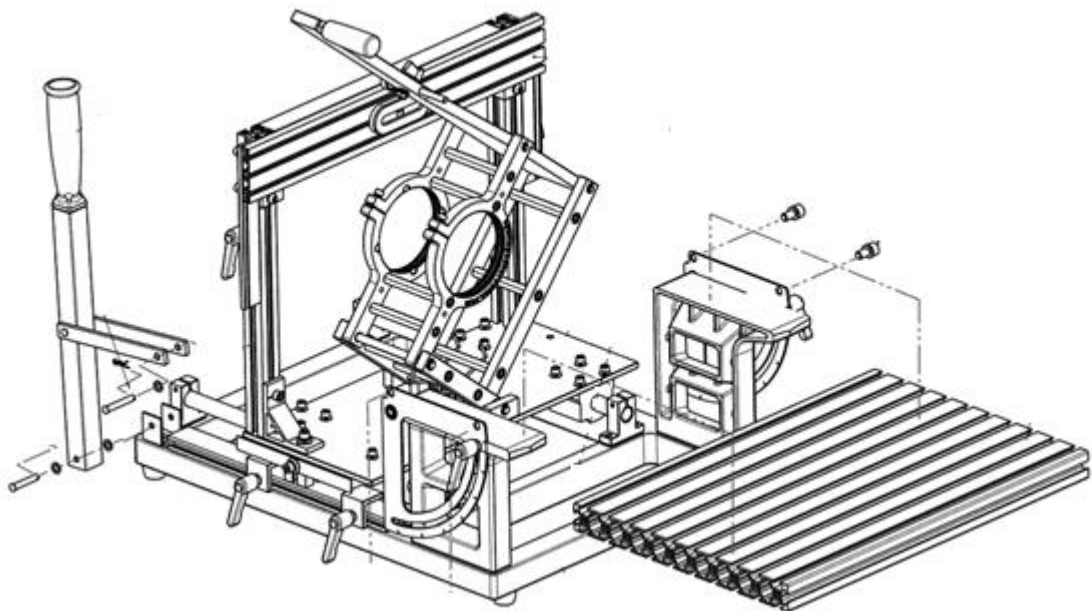


Рис.1.3 – Пантограф PantoJIG [3]

Отже переваги:

- простота кінематичної схеми;

- використання доступних та здатних до модернізації матеріалів стандартного профілю;
- велика жорсткість конструкції;
- можливість масштабування габаритних параметрів;
- використання уніфікованих деталей;
- великий показник ергономічності.

Недоліки схеми:

- обмежена висота обробки;
- обмежена геометрія для копіювання;
- відсутність можливості дублювати складну геометрію.

1.1.4 Пантограф Horizontal Mortising Machine (НММ)

Ця схема верстату Horizontal Mortising Machine [3] (рис. 1.4) є трансформованим варіантом пантографу розглянутого раніше, але з вирішенням його недоліків. Обмеження з робочою висотою обробки було вирішено, наданням конструкції, що утримує інструмент, додаткового степеню свободи.

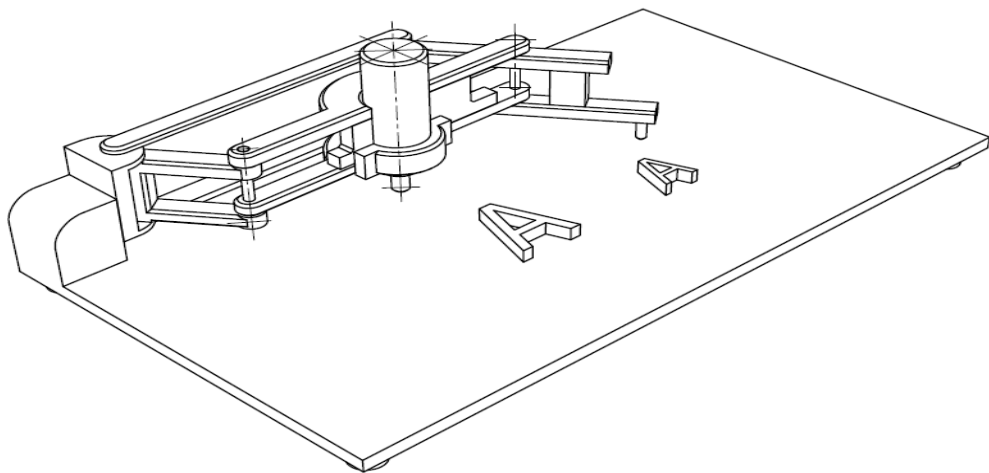


Рис. 1.4 - Пантограф Horizontal Mortising Machine [3]

Це рішення, як водночас вирішило питання з основним недоліком конструкції, так і спричинило виникнення нового, не менш вагомого. Під час обробки ,якщо мова заходить про роботу з великим об'ємом матеріа-

лу, у ніякому разі не можна допускати переривання обробки інакше додаткова степінь свободи інструментарію може призвести до отримання браку. До недоліків також можна віднести відсутність жорсткої фіксації шаблону та отриманої деталі. З точки зору ергономічності, вона також відсутня у відмінності від попередника.

Отже переваги:

- простота конструкції;
- велика жорсткість;
- можливість масштабування геометрії.

Недоліки схеми:

- обмежена геометрія для копіювання;
- відсутність можливості дублювати складну геометрію;
- низькі ергономічні властивості.

1.1.5 Копіювально-фрезерний верстат JET

Копіювально-фрезерний верстат JET[4] (рис. 1.5) має схожий принцип роботи з варіантом розглянутим у першу чергу, але все ж таки має суттєві відмінності.

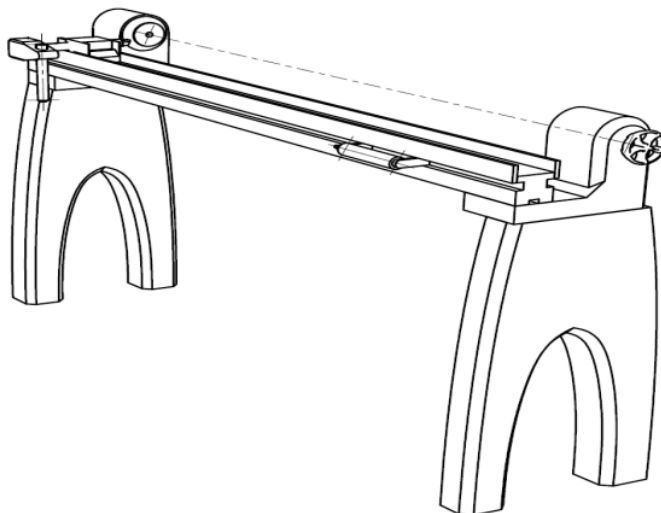


Рис. 1.5 - Копіювально-фрезерний верстат JET, [4]

Верстат також працює з моделями, що мають здатність обертатись навколо власної вісі, він виконаний з нержавіючої сталі, та має відносно

великі габарити 950 мм довжина робочого ходу, та 100 мм діаметрального допуску на обробку.

Ергономічні показники достатньо високі, та спеціальна розроблена схема керування дозволяє вести процес обробки на досить високому рівні без затрат додаткових зусиль. Вирішена проблема з жорсткістю направляючого елемента, що несе на собі блок з інструментальною базою верстата.

До недоліків слід віднести: лінійність виконання роботи та чітку послідовність рухів, що призводить, до зневаги до особливості геометрії поверхні кожної окремої деталі.

Отже переваги:

- жорстка направляюча здатність;
- високий ергономічний показник.

Недоліки:

- спеціалізований набір деталей, що викликає труднощі при складанні, транспортуванні та демонтажі;
- обмеження, що до геометричних особливостей при обробці.

1.2 Параметри гібридного стану

1.2.1 Привідна система

Через наявність ступенів свободи робочих органів верстату, що забезпечуються гібридним рухом, виникає потреба в їх автоматизації. З метою відтворення переміщень вузлів механізму приладу, завдяки прикладанню зусиль людини, у автоматичний режим, необхідно оснастити кожний рухомий вузол, серводвигуном. Важливим етапом вибору та інтеграцією двигуна є уникнення такої проблеми, як дискретність руху, що у свою чергу неможливо передбачити при розрахунку загальної конструкції на предмет негативних динамічних властивостей.

1.2.2 Каркас

В умовах обробки деревини, через неоднорідність структури матеріалу, сили різання, що досягають критичних відміток в сукупності з високою кількістю обертів інструменту, створюють великий резонуючий вплив на каркас конструкції. Головною умовою при проектуванні є підвищення параметрів жорсткості верстату, з урахуванням недоліків його аналогів, та наявністю елементів автоматизації.

1.2.3 Інструментальне забезпечення

Дослідження впливу критичних зусиль на ріжучу кромку інструменту під час обробки в рамках використання приладу, основна задача, що передбачається розрахунком та проектуванням спеціальної інструментальної бази верстату.

1.2.4 Точність обробки

Безумовно є одним з найважливіших параметрів станку, котрий безпосередньо пов'язаний з результатом обробки. Цей аспект робить прилад конкурентоспроможним на просторі аналогового ринку. Згідно попередньому прогнозу проблеми та ризики, що можуть впливати на точність обробки є зміщення вершин робочих органів інструменту та вимірювального оснащення, відносно осьових площин. Уникнення цих дефектів є без сумнівів розрахунок конструкції на предмет жорсткості та міцності. Впровадження обмежень обробки також входить у ряди обов'язкових мір, що допоможуть уникнути аварійних ситуацій, що вплинуть на точність обробки.

1.2.5 Якість обробки

Критерієм оцінки результату обробки в контексті застосування приладу, є не лише його точність, а і якість. Під якістю обробки мається на увазі шорсткість поверхні. Врахування таких параметрів, як стратегія

ручної обробки та геометричний тип інструменту мають значний вплив на цей критерій.

1.2.6 Ергономічні параметри.

Врахування ергономічних та естетичних параметрів стенду передбачає розробку та інтеграцію додаткових модулів, що зможуть забезпечити трансформування декількох простих рухів конструкції у єдиний складний. Відтворення цього процесу у комфортному для людини режимі і є рішенням ергономічних питань первинного характеру.

1.2.7 Уніфікованість

Використання уніфікованих складальних одиниць, для полегшення складання та демонтажу конструкції. До умов регулярного демонтажу є необхідність тимчасової зміни локації стенду. При необхідності повного демонтажу, а саме знищенню стенду, уніфікованість деталей є відмінною перевагою перед заздалегідь спроектованими унікальними конструкціями. Але використання універсальних деталей у повному обсязі є задачею неможливою. Саме через цей факт, слід уникати використання таких технологічних процесів при складанні, як зварювання та склеювання.

1.3 Інженерні задачі

1.3.1 Моделювання та розрахунок рамного каркасу

Задача по моделюванню та перевірці властивостей отриманої конструкції, шляхом комп'ютерного моделювання буде проведена в програмному забезпеченні Creo Parametric 2.0[15] . Інтегровані модулі симуляції дозволять досить чітко помістити об'єкт, що досліджується в умови реальної обробки, та визначити критичні зусилля.

1.3.2 Топологічна оптимізація вузлів

Оптимізація корпусних елементів вузлів приладу є досить важливою частиною дипломного проектування, через наслідки суттєвого зменшення витрат на ресурси. Оптимізація буде проведена у програмному середовищі Autodesk Inventor 2017[14].

1.4 Маркетинговий аналіз стартап-проекту

Перший етап

На першому етапі маркетингового аналізу, необхідно максимально доступно описати сутність та концепцію нашого проекту, опираючись на факти необхідності застосування гібридного стенду в рамках становища сучасного ринку.

Другий етап

Після становлення ідеї проекту на другому етапі реалізації необхідно прорахувати календарний план проекту з урахуванням можливих ризиків та факторів, що можуть спричинити труднощі та у певному обсязі зупинити процес проектування та впровадження. Врахування затрат на кожному з етапів календарного плану, а саме витрат на :ресурси матеріальні, розумові затрати та можливості, кількість працівників для поставлення та виконання конкретних задач.

Третій етап

З урахуванням матеріальних витрат визначених на попередньому етапі, будується інвестиційна база витрат, у наслідку чого в рамках створення автономної компанії формується статут підприємства необхідний для реалізації впровадження проекту на ринкову платформу.

Четвертий етап

Четвертий етап спрямований на пошук інвесторів, та в залежності від типу вкладника, сепарацію інвестиційних пакетів.

1.5 Висновки по розділу

Згідно аналізу поточного стану ринку на предмет виявлення аналогів пристосованих до автоматизації принципової схеми. Основні питання, що слід вирішити, це огляд нової більш жорсткої конструкції каркасу стенду, підвищення ергономічних властивостей та модифікування питання стосовно уніфікованості складальних одиниць

ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТЕНДУ

Розглянувши у попередньому розділі слабкі та сильні сторони конкурентоспроможних аналогів, можемо зробити висновки опираючись на результат дослідження та впровадження додаткових заходів щодо модернізації власного виробу.

2.1 Концепція майбутнього виробу

Майбутній виріб згідно концептуальним параметрам повинен забезпечувати ряд функцій та відповідати певним критеріям:

- Синхронізоване перетворення сукупності рухів, що по своїй кількості відповідають кількості ступенів вільності конструкції , у єдиний складний рух з відсутністю характерної дискретності.

- Точність та якість обробки

- Принципова схема стенду має бути оптимізованою під трансформацію його при необхідності у більш чи менш габаритний робочий прототип без значних втрат параметрів оговорених у цьому підрозділі.

- Часткове або повне використання уніфікованого складального каркасного профілю, що у наслідку визначить попередні параметри, са-

ме через це визначення цього питання є першим етапом розрахунку стенду.

У якості елементів рамної конструкції найбільш вдалим рішенням є використовувати стандартні профілі, або конструкції, що можуть бути легко зібрані чи демонтовані. Обґрунтуванням надійності конструкції є розрахунок її у статичному та динамічному середовищах. Так як прилад працює в умовах пов'язаних з обробкою, а саме процесом різання деревини, основними та майже єдиними джерелами збуджування сил, є зусилля котрі виникають під час різання. Отже розрахуємо максимальні навантаження на конструкцію, визначивши режими різання у найбільш некомфортних умовах.

2.2 Режими різання [5]

Другим етапом до побудови аналізу є визначення характеру сил, що виникають під час експлуатації досліджуваного об'єкту. Без сумніву у нашому випадку це є сили різання та моменти, що вони викликають. Проведемо розрахунковий аналіз сил, при торцевому фрезеруванні.

Вихідні дані

***D=8 мм** (діаметр фрези, був обраний, як найбільш допустимий згідно ТЗ, D=3...8 мм)*

***n=24000 об/хв** (згідно навчальному посібнику, І.Т.Глебов "Обработка древесины методом фрезерования ", фрези, що мають робочий діаметр менший за 25 мм, працюють при діапазоні обертів n=20000...24000 об/хв*

*Оброблюваний матеріал - **дуб**(був обраний як найбільш складний при обробці вид деревини, що використовується у декоративній справі).*

Визначення швидкості різання

$$v = \frac{\pi \cdot D_{cp} \cdot n}{60000} = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 24000}{60000} = 8,816 \quad [м/с] \quad (2.1)$$

Подача на зуб. Так як не існує точно визначеної залежності між робочим діаметром фрези та кількістю її зубів, то було вирішено провести

декілька розрахункових ітерацій для визначення подачі на зуб при парній(z_0) та не парній(z_1) кількості зубів

$$S_{z_{0...1}} = \frac{1000 \cdot v}{z_{0...1} \cdot n} [\text{мм}] . \quad (2.2)$$

Діапазон кількості зубів

$$z_0 = 2,4 \dots 10,$$

$$z_1 = 3,5 \dots 11.$$

У результаті отримаємо матриці значень

$$S_{z_0} = \begin{pmatrix} 0.184 \\ 0.092 \\ 0.061 \\ 0.046 \\ 0.037 \end{pmatrix}; S_{z_1} = \begin{pmatrix} 0.122 \\ 0.073 \\ 0.052 \\ 0.041 \\ 0.033 \end{pmatrix}.$$

Визначення товщини шару, що зрізається

$$A_m = S_z \cdot \sin \sigma_m \cdot \sin \varphi_m \quad (2.3)$$

де σ_m - значення кута контакту зуба фрези для точки m ;

φ_m - значення кута профілю в досліджуваній точці ріжучої кромки.

Так як ми маємо фрезу досить малого діаметру та радіальна складова вимірюються у незначному діапазоні, кути $\sin \sigma_m$ та $\sin \varphi_m$ майже дорівнюють 90° , з цього робимо висновок, що

$$A_m = S_z . \quad (2.3.1)$$

Визначимо кінематичний кут зустрічі

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{S_z}{D}} , \quad (2.4)$$

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{0.037}{8}} = 4,1^\circ.$$

Довжина дуги контакту

$$l = \frac{A_m}{\sin \theta} = \frac{0.037}{\sin(8,74)} = 0,6.$$

Середня дотична сила різання

$$P = (a_p \cdot p \cdot b + S_z \cdot \sin \theta \cdot k \cdot b) \frac{l}{t}. \quad (2.5)$$

де a_p - коефіцієнт враховуючий гостроту леза;
 p - питома сила різання по задній поверхні зуба;
 b - ширина фрезерування;
 k - середній умовний тиск по передній поверхні леза;
 t - крок між зубами фрези.

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \cdot \Delta \rho}{\rho_0}, \quad (2.6)$$

$$\Delta \rho = \varepsilon \frac{l \cdot n \cdot T}{1000} [\text{мкм}] \quad (2.7)$$

де ε - коефіцієнт відповідальний за притуплення зубів на шляху в 1 мм, та рівний при фрезеруванні та струганні дуба, $\varepsilon = 0,14$;
 ρ_0 - коефіцієнт, що визначає допустиме відхилення від вихідного радіуса кривизни інструменту при обробці дуба та приймається в діапазоні від 4 до 5 мкм

$$\Delta \rho = 0,14 \frac{0,6 \cdot 24000 \cdot 60}{1000} = 121 \text{ мкм.}$$

При фрезеруванні питома сила різання на задній поверхні зуба, для дубу можна визначити як:

$$p = 0,21 + 0,046 \cdot \epsilon \quad [\text{к}^2/\text{м}] \quad (2.8)$$

де ϵ , показник, котрий залежить від напрямку подачі та напрямку волокон деревини.

Обираємо випадок коли процес різання протікаю проти напрямку шару деревини ($\theta_1 = 90$). У такому випадку:

$$\epsilon = (\theta_1 - \theta) = (90 - 4) = 86,$$

$$p = 0,21 + 0,046 \cdot 86 = 4,16 \text{ кг/м},$$

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \cdot 121}{5} = 5,842,$$

$$k = A_\epsilon \cdot \delta + B_\epsilon \cdot (90 - \nu) - B_\epsilon \left[\frac{\text{кг}^2}{\text{мм}^2} \right]. \quad (2.9)$$

коефіцієнти A, B та B залежать від показника ϵ та можуть бути визначені згідно номограми, отримана формула має загальний вигляд та потребує конкретики для кожного випадку окремо, в залежності від породи деревини, що оброблюється

$$A = 0,075; B = 0,025; B = 2,25,$$

$$\delta = 50 - 75^\circ.$$

При обробці дуба параметр k , можна розрахувати як:

$$k = (0,028 + 0,0006\epsilon)\delta + (0,009 + 0,0002\epsilon)(90 - \nu) - (0,76 + 0,02)\epsilon,$$

$$k = (0,028 + 0,0006 \cdot 81,26)\delta + (0,009 + 0,0002 \cdot 81,26)(90 - 8,816)$$

$$- (0,76 + 0,02) \cdot 81,26 = 4,27 \text{ кг/мм}^2.$$

Таким чином

$$P = (5,842 \cdot 4,166 \cdot 8 + 0,037 \cdot \sin(4,1) \cdot 4,27 \cdot 8) \frac{0,6}{36} = 3,25 \text{ кг}.$$

Потужність різання

$$N = \frac{P \cdot \nu}{102} = \frac{3,25 \cdot 8,816}{102} = 0,32 \text{ кВт}. \quad (2.10)$$

Сила різання по задній поверхні зуба фрези

$$P_3 = (a_p - 0,8) \cdot p \cdot b \frac{l}{t} [\text{кг}] , \quad (2.11)$$

$$P_3 = (5,842 - 0,8) \cdot 4,16 \cdot 8 \frac{0,6}{36} = 2,8 \text{ кг}.$$

Сила різання по передній поверхні зуба фрези

$$P_n = P - P_3 = 0,446 \text{ кг}, \quad (2.12)$$

$$P_z = 0,5 \cdot a_p^2 \cdot P_3 - P_n \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi_{mp}) [\text{кг}], \quad (2.13)$$

$$\varphi_{mp} = \operatorname{const} = 15^\circ,$$

$$P_z = 0,5 \cdot 5,842^2 \cdot 2,8 - 0,446 \cdot \operatorname{tg}(90 - 60 - 15) = 47,7 \text{ кг},$$

$$P_x = P \cdot \cos\theta + R \cdot \sin\theta \text{ [кг]}, \quad (2.14)$$

$$P_x = 3,25 \cdot \cos(4,1) + 47,7 \cdot \sin(4,1) = 6,57 \text{ кг},$$

$$P_y = P \cdot \sin\theta - R \cdot \cos\theta \text{ [кг]}, \quad (2.15)$$

$$P_y = 3,25 \cdot \sin(4,1) - 47,7 \cdot \cos(4,1) = -47,37 \text{ кг}.$$

Переведемо отримані величини сил у ньютони та занесемо значення у таблицю 2.1

Таблиця 2.1- Сили що діють під час різання

Сила	Значення[кг]	Значення[Н]
P	3,25	31,85
P_3	2,8	27,44
P_n	0,446	4,37
P_z	47,7	467,46
P_x	6,57	64,386
P_y	47,37	428,26

Напрямок дії розрахованих сил вказаний на рис. 1.2

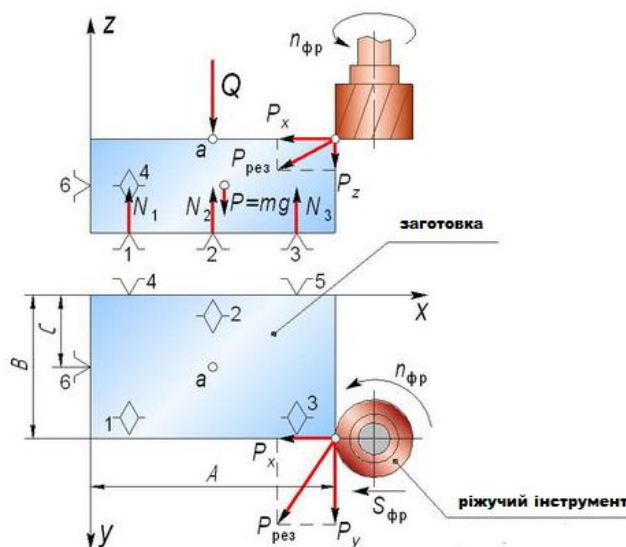


Рис.2.2 – Схема напрямку дії сил різання [5]

2.3 Статичний аналіз

Першим кроком до вирішення статичного потенціалу конструкції є її узагальнення до примітивної принципової схеми, що відображає взаємозв'язки між елементами конструкції. Так як у нашому випадку переважна більшість елементів з'єднуються між собою за допомогою епоксидної смоли, було вирішено відображати на схемі подібні з'єднання, як точкові з'єднання.

Концептуальна примітивна схема майбутньої конструкції представлена на рис. 2.1. Умовно її можна поділити на дві частини.

Частина перша

Частина перша - що є фундаментом, та виконує відповідні функції, а саме утримання на собі рухомих та робочих органів конструкції, фіксація опорних частин таких, як столи для утримання копіру та заготовки.

Частина друга

Частина друга - що безпосередньо є робочим органом, та бере участь в механічній обробці заготовки, та спрямування інструмента.

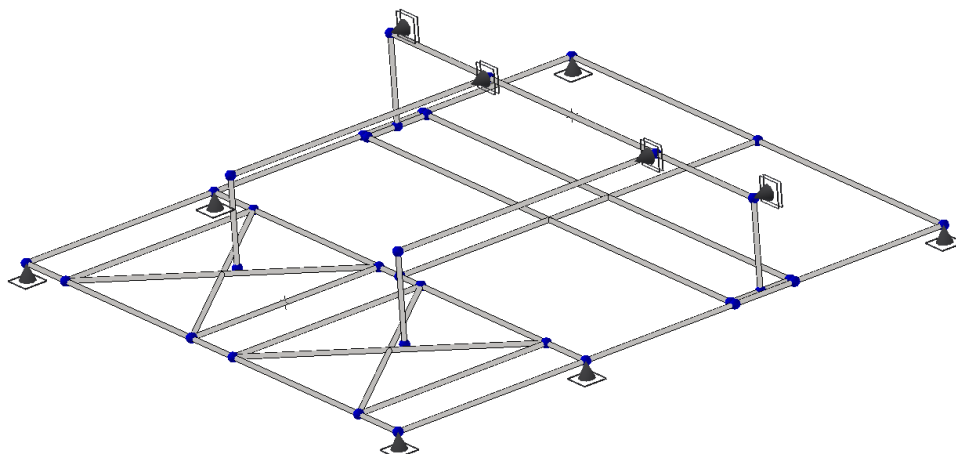


Рис.2.1-Принципова статична схема конструкції

2.3.1 Статичний лінійний аналіз фундаменту

Для визначення навантажень, що можуть негативно впливати, як на процес обробки, так і безпосередньо на конструкцію взагалі, використовують методи, що дозволяють досить точно відтворити процеси навантажень, та у наслідку проаналізувати та спрогнозувати, як у нашому випадку, можливі критичні деформації, чи недопустимі відхилення.

Серед методів, що дозволяють визначити поточний стан конструкції у певний момент часу в роботі, варто виділити *статичний лінійний аналіз*. Статичний лінійний аналіз - це аналіз, головними аспектами якого є не тільки геометрія конструкції, та її вага, а й ще і фізико-механічні властивості компонентів конструкції. Аналіз враховує напруження та моменти, що виникають під час статичного стану конструкції, розміщуючи досліджуваний об'єкт у лінійне середовище.

Для побудування такої складної математичної моделі, як лінійний аналіз, було використано спеціальне програмне забезпечення *Autodesk Inventor 2017*.

Так як процес різання є досить складним процесом, та на даному етапі вивчення досить залишається теоретичним, то розглянемо його саме з цієї сторони. За умовою відомо, що різання відбувається у певній зоні, та викликає відповідні сили. Згідно схемі, що була представлена

вище, можна побачити точний напрямок цих сил, але це говорить лише про їх розташування відносно інструмента. Щоб точніше розрахувати міцність конструкції, яка постійно піддається збудженню сил різання, треба урахувати складну математичну модель, що утворюється під час обробки.

Розглянемо типові профілі ланок на прикладі ітераційного дослідження та розробці прототипів верстата.

У кожний момент часу точка, що контактує з оброблюваною поверхнею змінює своє радіальне положення, змінюючи відповідно напрямки векторів сил, за виключенням вектору P_z , котрий переміщується лише по периферії інструмента. Виходячи з цього положення робимо висновок, що положення точки, що досліджується, має нескінченну кількість положень і ще більшу нескінченність напрямку векторів. Прикладемо зусилля до центральної точки стола згідно будь-якої з варіантів схем. (рис. 2.3)

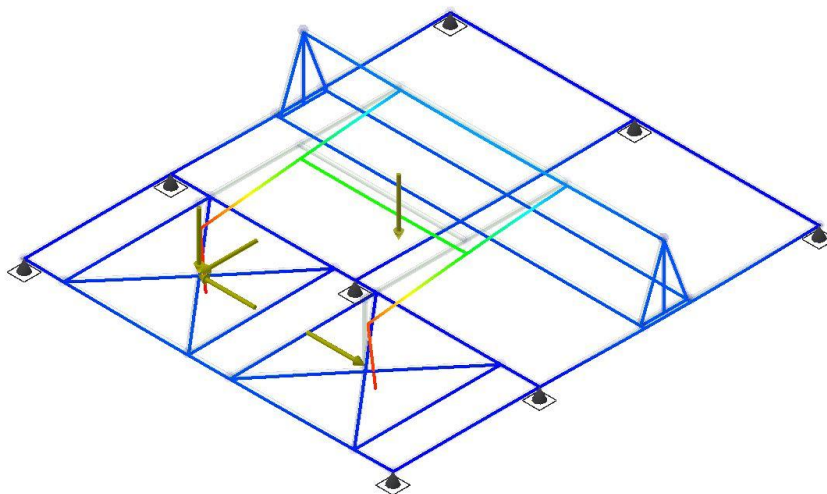


Рис.2.3 - Перша ітерація статичного навантаження каркасу

Реакція опори, діє на ланку протилежну тій, що несе на собі інструмент, та рівна за силою та протилежна за напрямку силі різання, що відтискає інструмент від заготовки.

Згідно результатам можна побачити, що конструкція досить жорстка та витримує розраховані навантаження втричі більші за фактичні значення. Так як перший прототип було вирішено виготовити з фанерного листа, опираючись в першу чергу на вартість та доступність даного матеріалу, необхідно замінити балки обраного каркасу на більш характерний профіль для фанерних листів. Проведемо заміну балок окремо для кожної ділянки, порівнюючи її фізико-механічні властивості, та послідовно інтегруючи їх у загальну конструкцію.

Для прикладу оберемо стандартні профілі швелера та двотавра, та проведемо заміну с розрахунками. Для прикладу оберемо середні показники товщини стінок профілю, але з утриманням пропорцій загальної конструкції. Обрані профілі: двотавр(ANSI S4x9.5) та швелер(ISO 800000130). прикладемо ті ж самі навантаження до нової конструкції.(рис. 2.4 – 2.5)

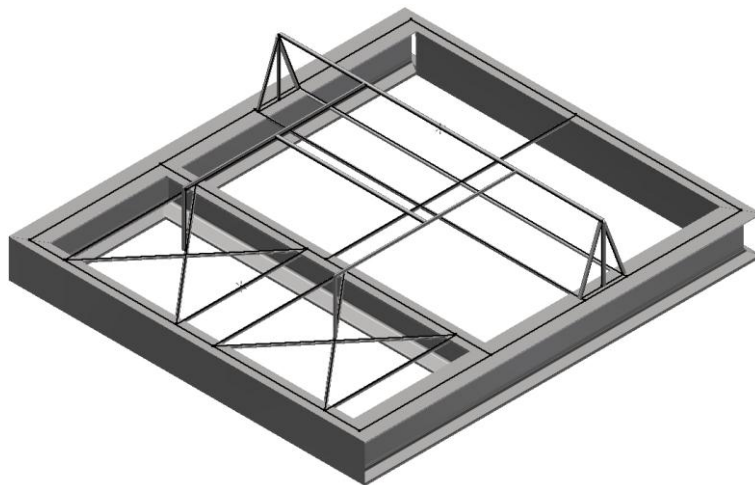


Рис.2.4- Оновлена каркасна конструкція

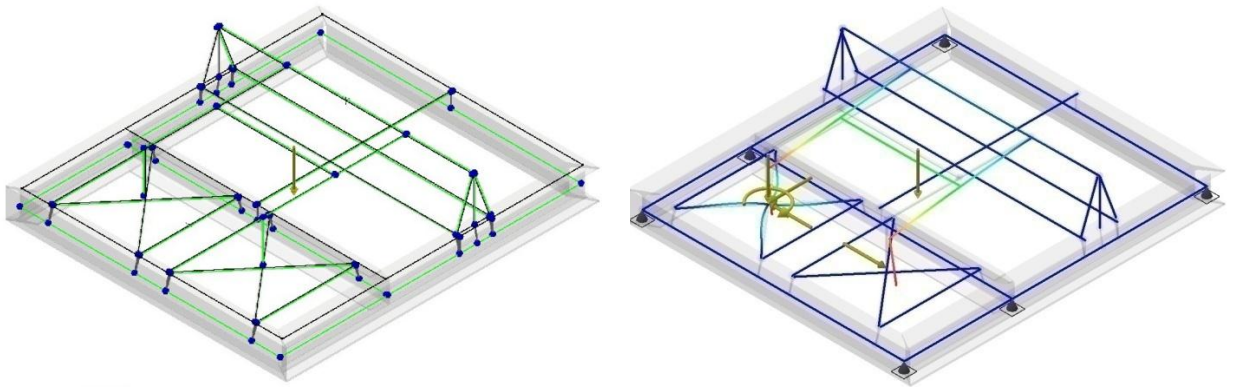


Рис.2.5 - Аналіз оновленої конструкції.

Порівнюємо фізико-механічні властивості окремих балок з обраними профілями.

Двотавр (ANSI S4x9.5)(рис.2.6)з характеристиками:

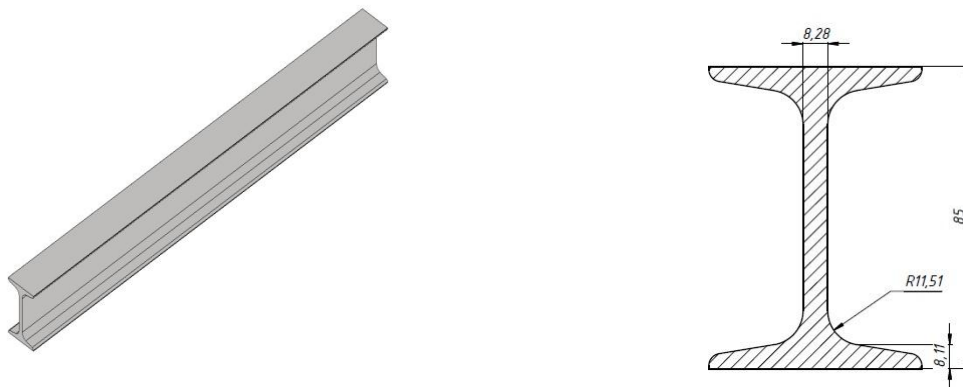


Рис. 2.6 - Двотавр (ANSI S4x9.5)[14]

Запропонований профіль, що є складальною одиницею представлений на рисунку 2.7. Товщина фанерного листа є величиною стандартизованою та являє собою діапазон від 2 до 35 мм. Для порівняння було обрано товщину співпадаючу з товщиною стінок двотавру. Для перевірки граничних навантажень прикладемо довільні зусилля та моменти, що за своїми значеннями значно перевищують ті, що будуть виникати при експлуатації об'єкту.

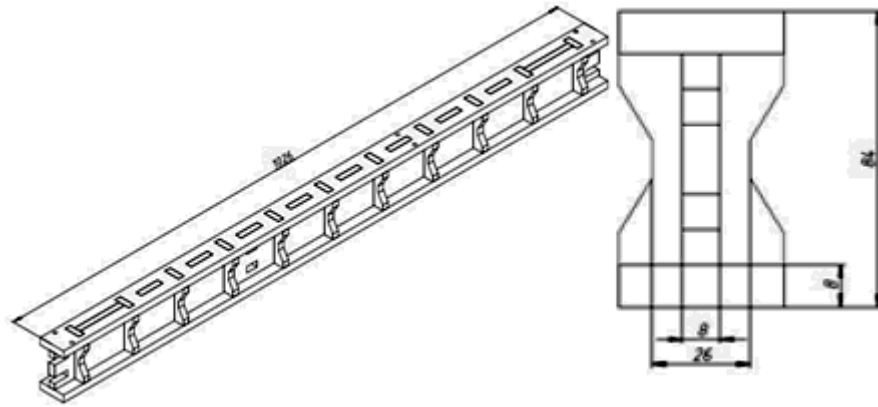


Рис. 2.7 - Запропонований профіль бічної сторони каркасу

При навантаженні вихідної балки(двотавру) за умовою фіксації по одному торцю та прикладання зусилля значенням 100 Н, та моменту 100 Н/м, максимальне значення зміщення дорівнює 0,05 мм,(рис2.8). Прикладемо ті самі зусилля але у інших напрямках для отримання більш детальної інформації про властивості балки.

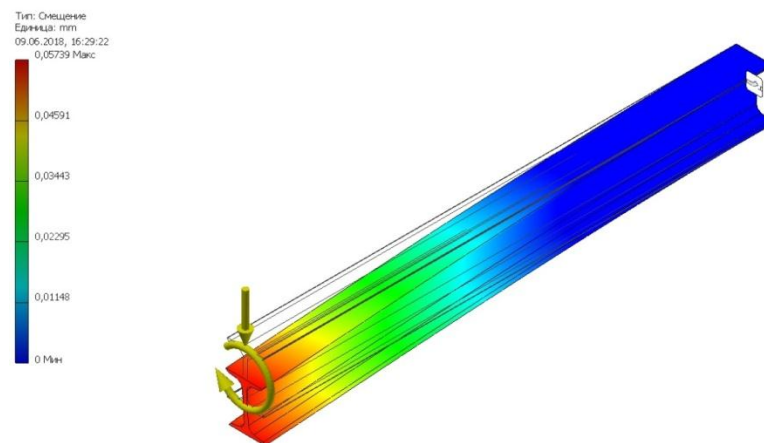


Рис. 2.8 - Навантаження двотавра по горизонтальній площині з фіксацією по одному торцю(Дослідження 1)

При прикладанні зусиль у іншій площині значення зміщення досить сильно відрізняється та дорівнює 0,4 мм, рис. 2.9.

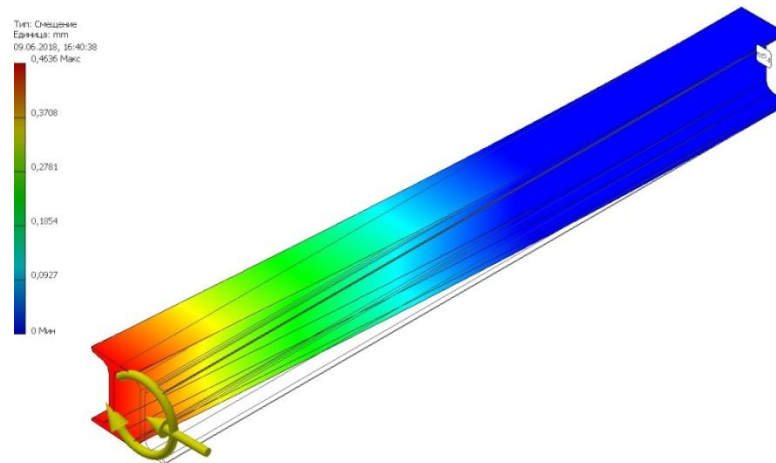


Рис.2.9 - Навантаження двотавра по вертикальній площині з фіксацією по одному торцю (Дослідження 2)

Слід відмітити, що це відхилення є досить суттєвим, та при порівнянні з запропонованою конструкцією, слід уникнути подібних деформацій.

При фіксації двотавра по двом торцям зміщення дорівнює близько до 0,01 , що є допустимим для нас значенням, рис.2.10.

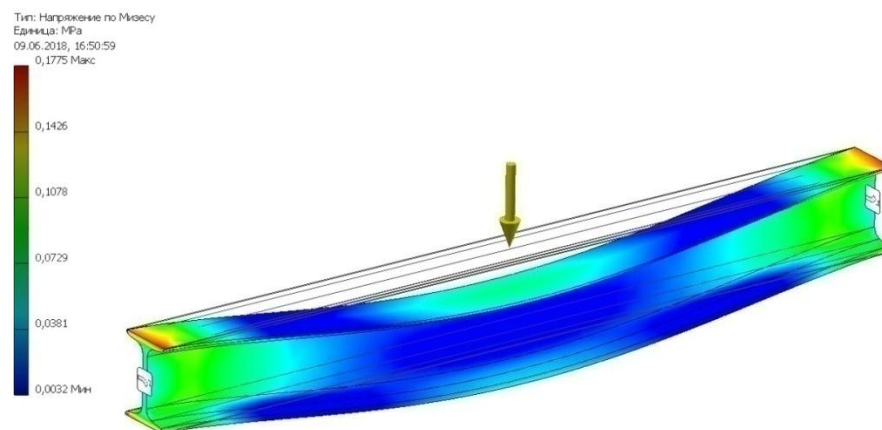


Рис.2.10 - Навантаження двотавра по горизонтальній площині з фіксацією по двом торцям (Дослідження 3)

Проведемо ті самі дослідження з запропонованою конструкцією, рис.2.11

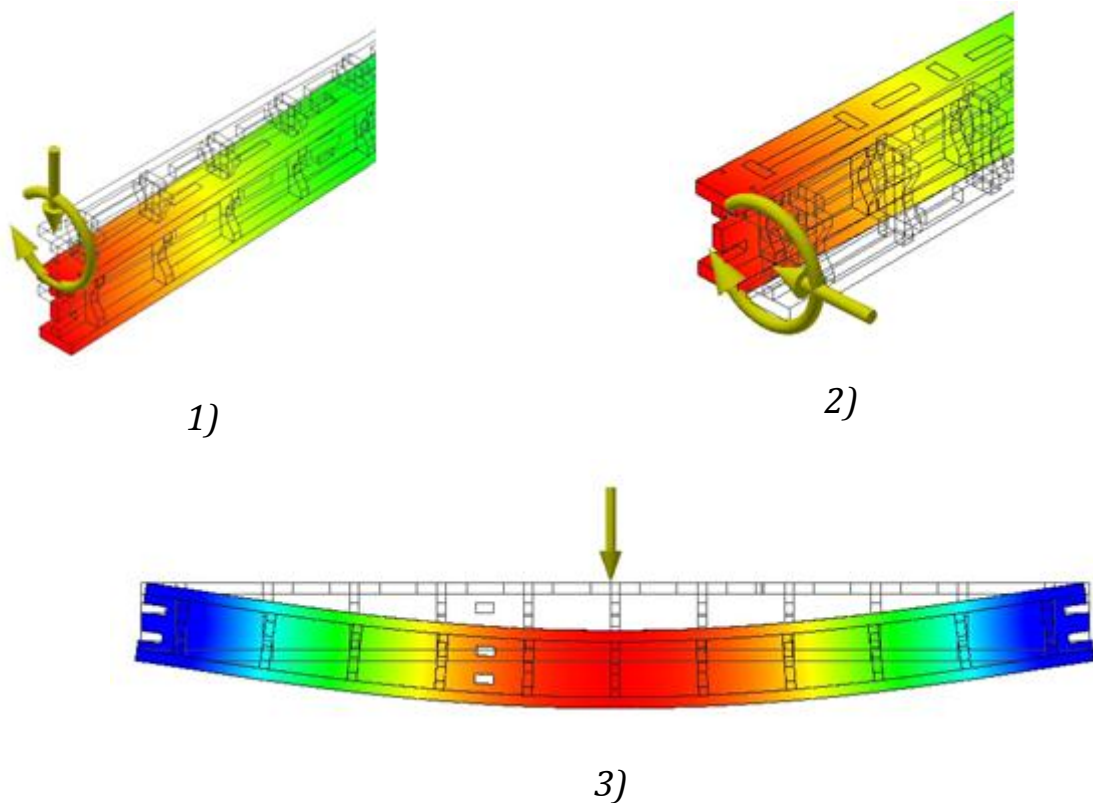


Рис. 2.11 - Аналіз запропонованої конструкції

Згідно аналізу було визначено, що найбільші відхилення виникають при прикладанні зусиль до вертикальних площин конструкції, та дорівнюють майже 2 мм. Для уникнення цієї деформації біло проведено повторну ітерацію прикладання зусиль з поступовим збільшенням товщини профілю . Результати представлені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 - Значення зміщення, мм в залежності від товщини фанери

Товщина фанери	10	12	14	16
№ Дослід				
1	0,4	0,12	0,07	0,065
2	2,1	1,7	1,3	0,6
3	0,004	0,004	0,003	0

Урахувавши значення було вирішено використовувати комбіновану товщину фанерного листа, для уникнення зайвих витрат на матеріал.

Наступною балкою що потребує перевірки є балки, що виконують роль проміжних між бічними, та забезпечують, як утримання конструкції у певному положенні, так і фіксацію окремих елементів. У якості порі-

вняння буде використовуватись швелер(ISO 800000130)(рис.2.12) з характеристиками:

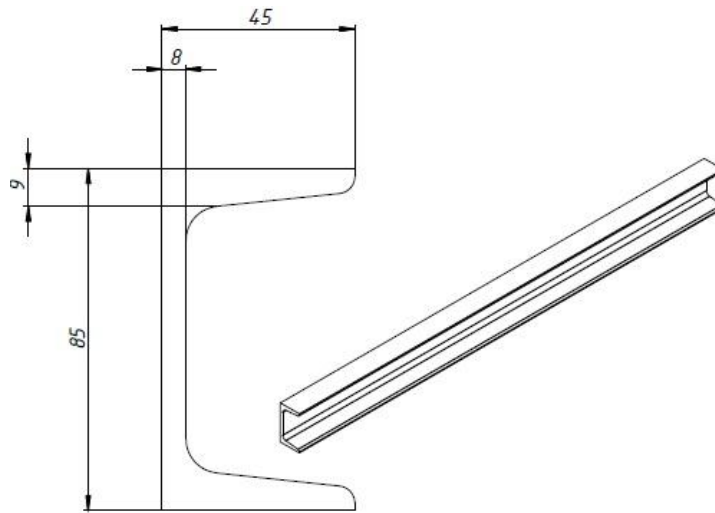


Рис.2.12 - Швелер(ISO 800000130)[14]

Виконаємо ряд послідовних навантажень проведених у попередніх дослідях, рис. 2.13.

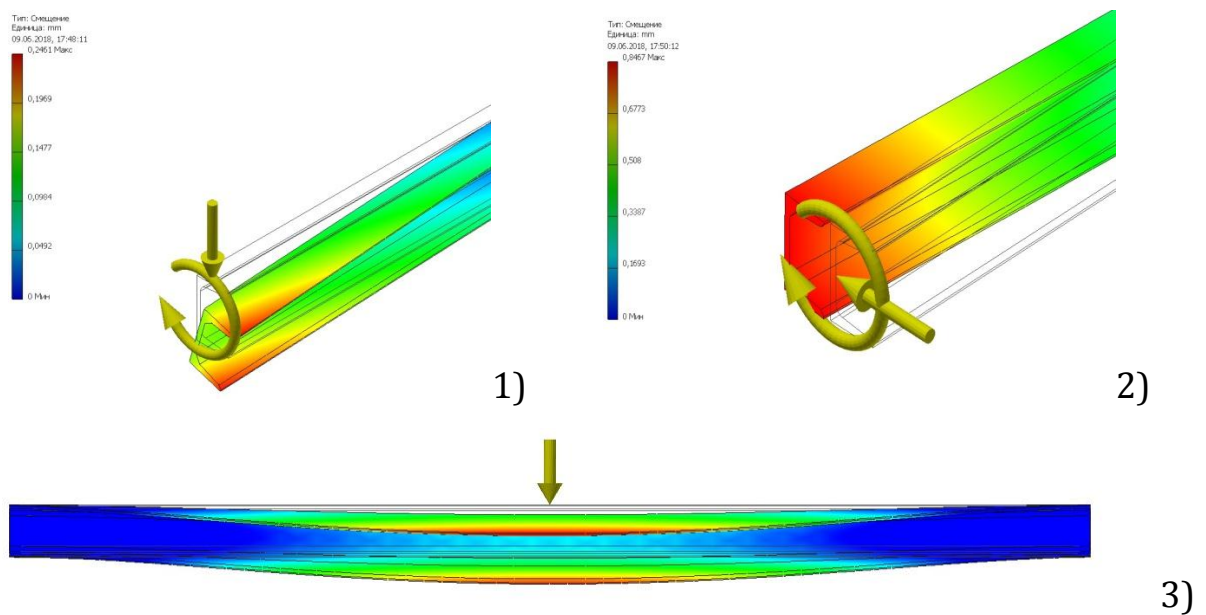


Рис.2.13 - Аналіз швелера

Проведемо аналіз запропонованої конструкції зображену на рисунку 2.14

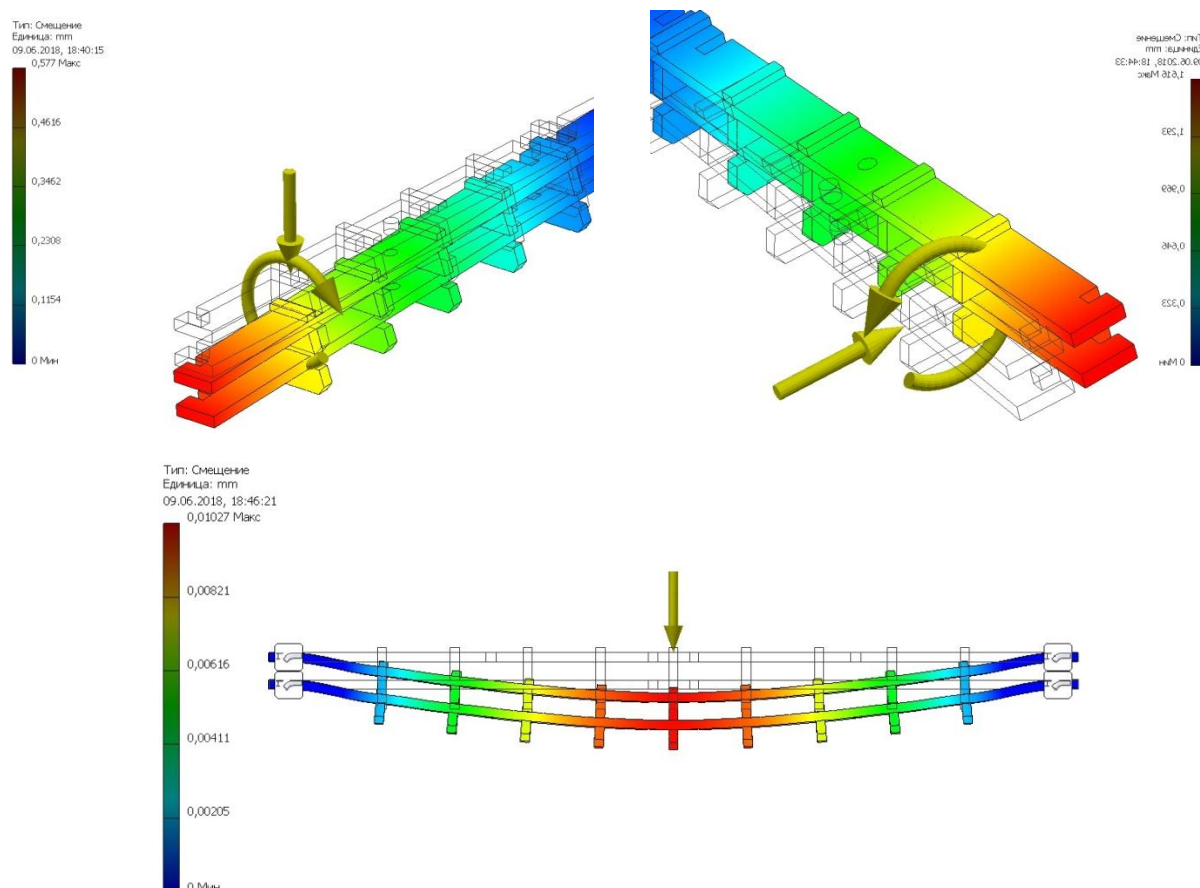


Рис. 2.14 - Аналіз запропонованої конструкції

До загальної конструкції також входять столи та рейка, що забезпечують функціонал. Поєднавши балки отримаємо конструкцію представлену на рисунку 2.15

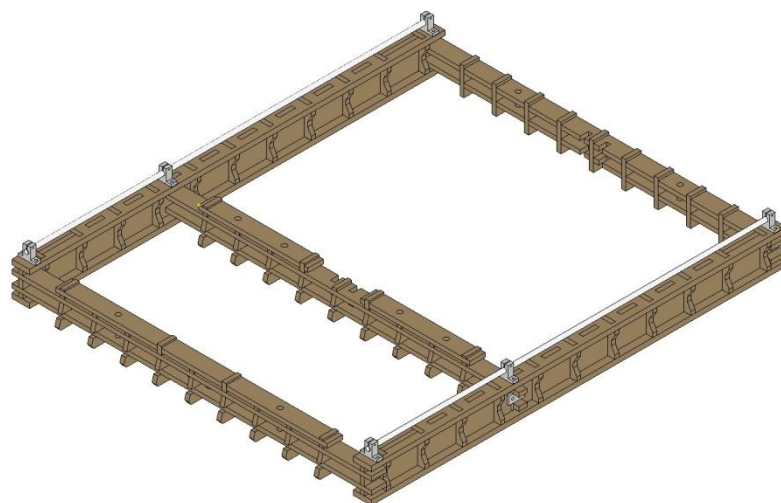


Рис.2.15 - Конструкція фундаменту у зборі

Додавши додаткові елементи такі як столи для утримання заготовок та рейку отримаємо наступну конструкцію, рис. 2.16.

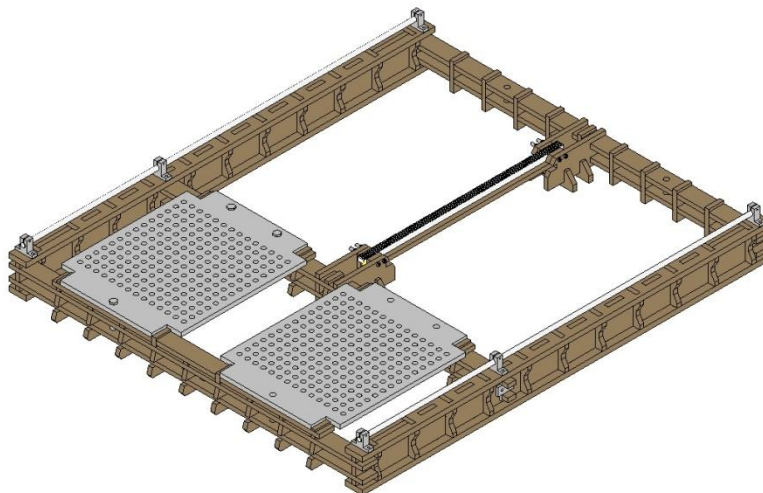


Рис.2.16 - Загальна конструкція фундаменту

Проведемо аналіз цієї конструкції згідно схемі сил розглянутій раніше та прикладемо трьохкратні зусилля та моменти, що виникають під час різання (рис. 2.17).

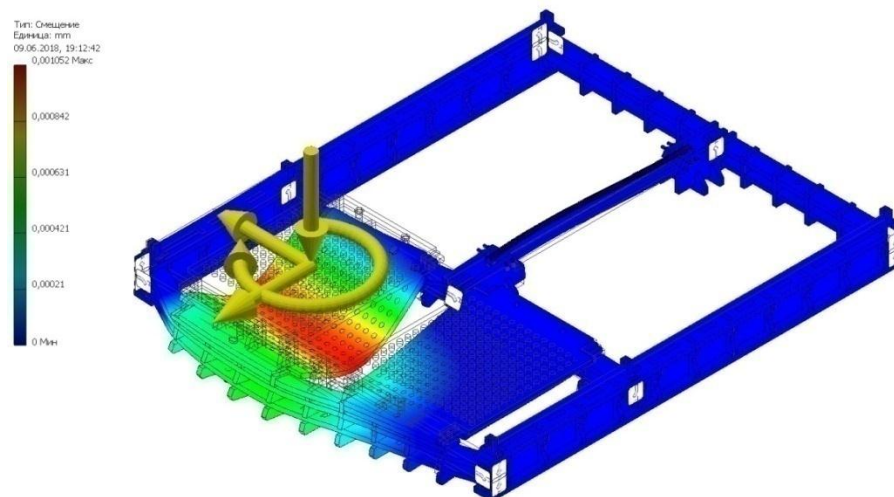


Рис.2.17. - Аналіз загальної конструкції фундаменту

Згідно аналізу найбільшим відхиленням від номінальної форми є ділянка у робочій зоні та її значення становить 0,152 мм. Цей показник є доволі великим, тому було розглянуто іншу принципову схему жорсткої статичної рами конструкції. Ця схема заснована на використанні уніфі-

кованих складальних одиниць Bosh[7]. Принциповою відмінністю є легкість складання и демонтажу та надзвичайно великі показники жорсткості. Були обрані профілі с розмірами 200×100 (рис. 2.18).

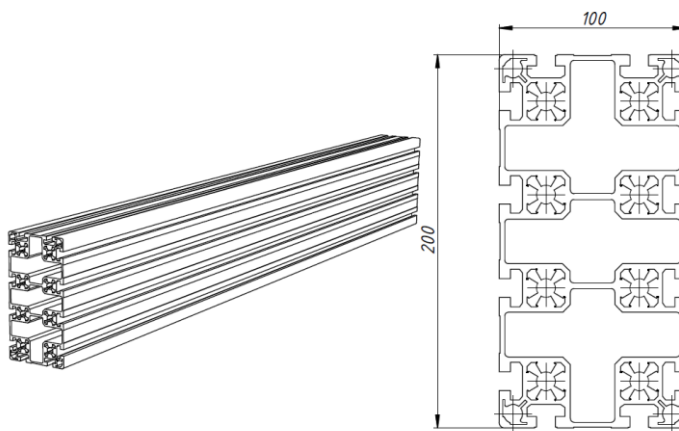


Рис. 2.18 - Профіль Bosh (200×100)

Досить важливою перевагою цієї конструкції є відсутність необхідності використовувати методи зварювання чи склеювання. Елементи що забезпечують з'єднання також є уніфікованими (рис. 2.19)

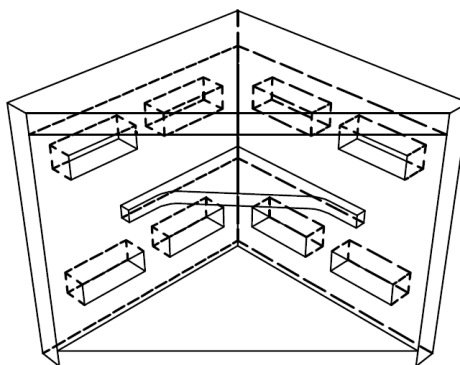


Рис. 2.19 - Кутовий перехідний елемент Bosh

Прикладання аналогічних зусиль, в усіх можливих площинних напрямках зображенні на рисунку. Найбільший показник зміщення відносно номінальної геометрії профілю дорівнює 0.026 мм (рис. 2.20)

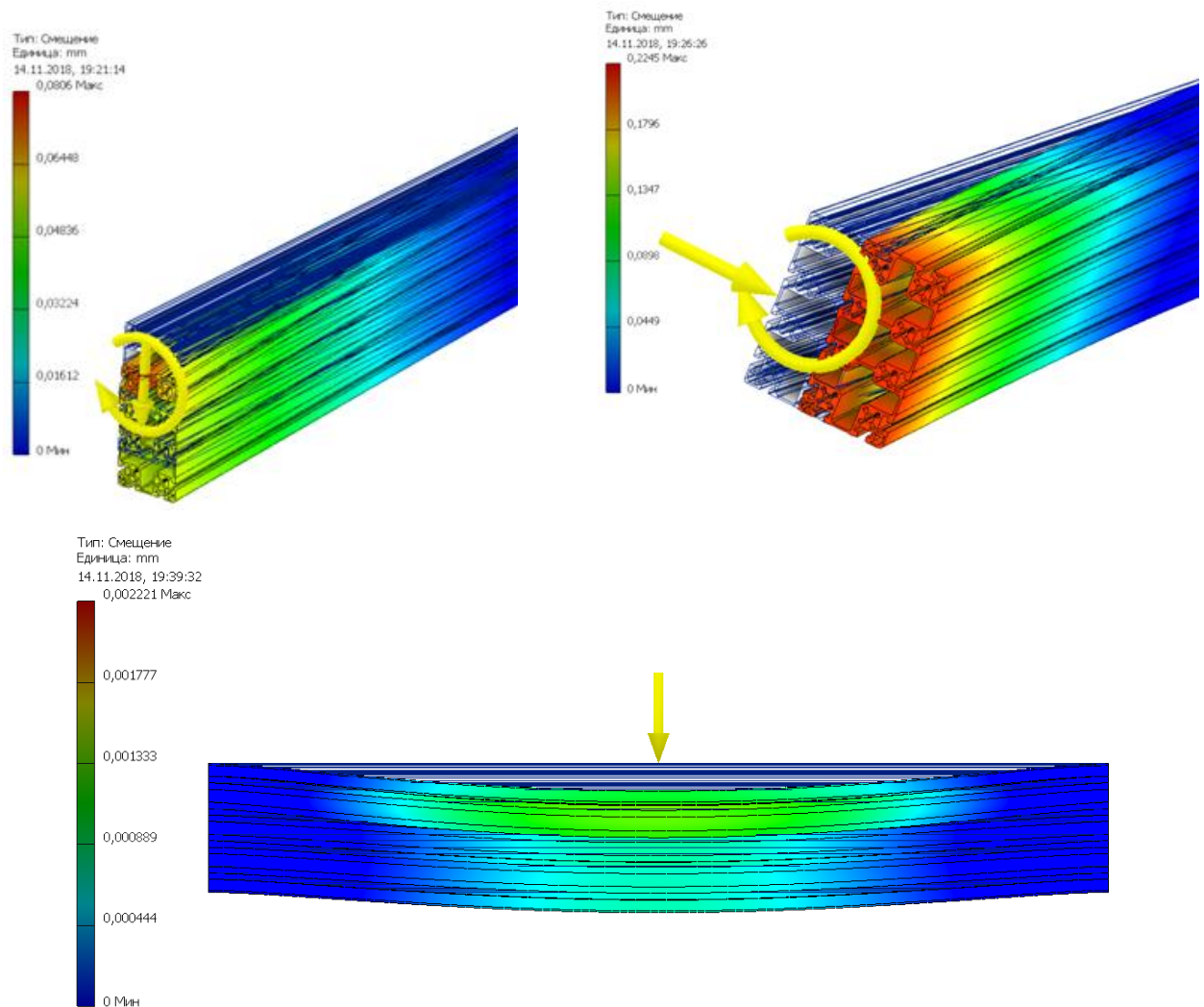


Рис. 2.20 - Результаты анализів

Проведемо загальний статичний аналіз нової схеми конструкції (рис.2.21) аналогічний тому, що був проведений з попереднім прототипом.

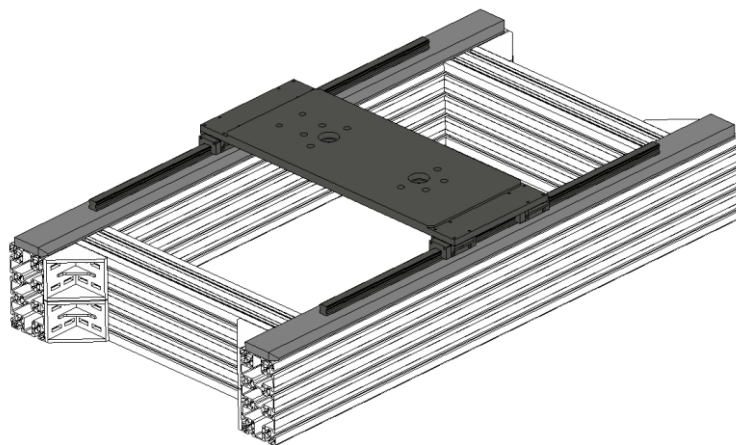


Рис. 2.21 - Схема конструкції

Згідно аналізу максимальним відхиленням від номінальної форми в конструкції є значення, що дорівнює 0.00758 мм, що є досить високим показником точності при обробці(рис. 2.22).

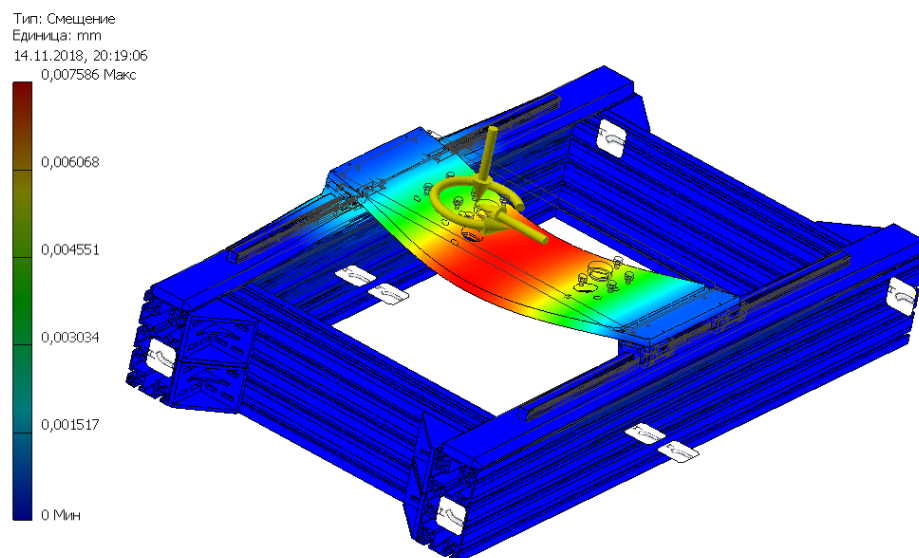


Рис. 2.22 - Результат статичного аналізу.

2.2.2 Статичний аналіз каркасу виконавчого модуля

Проведемо аналогічні розрахунки з виконавчим модулем стенду. В врахування збуджуючих навантажень йдуть усі зусилля, що виникають під час обробки та власна маса. Основною метою статичної перевірки є перевірка показника жорсткості та міцності конструкції, та визначення похибки при обробці, через потенційне зміщення вершини інструменту відносно вершини щупу в осьовій проекції.

У якості основи елементів каркасу було вирішено використовувати звичайний трубний профіль з квадратним січенням, через простоту обробки поверхонь, та подальшу необхідність опрацювання торцевих поверхонь профілю. Результати аналізу вказані на рисунку 2.23.

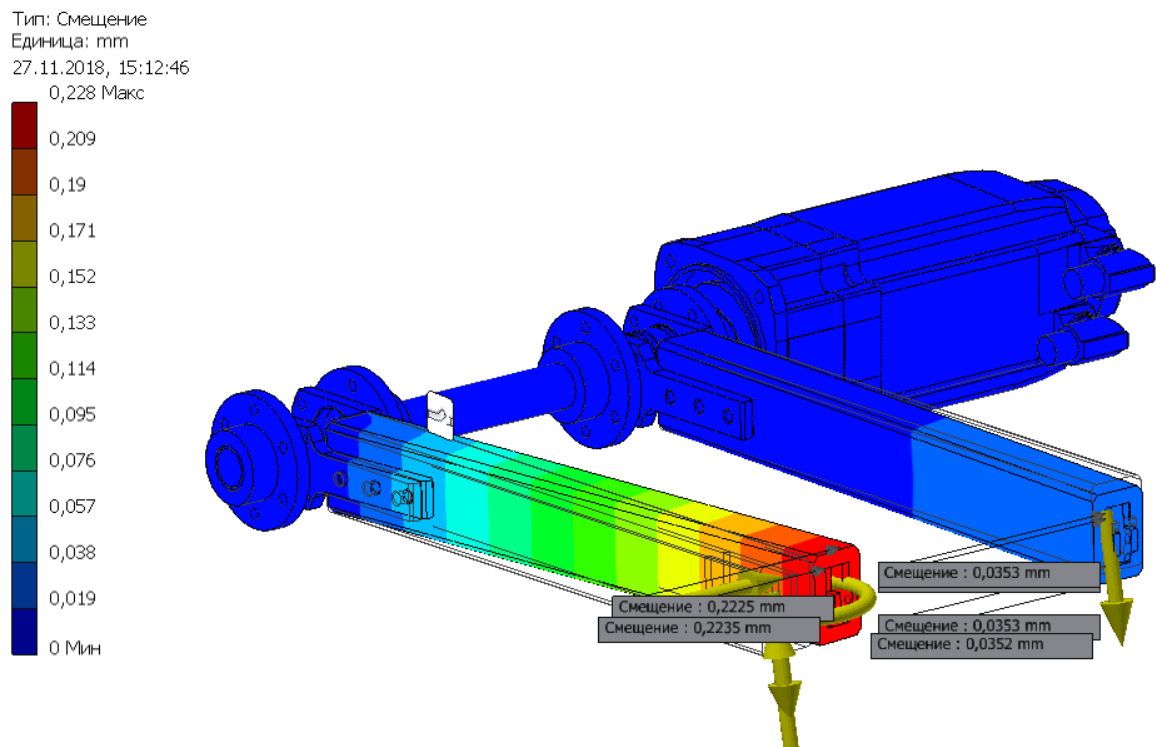


Рис.2.24 - Результат аналізу виконавчого модуля

Згідно аналізу максимальним сумарним осьовим зміщенням вершини інструменту є $\Delta = 0.25$ мм, що є допустимим значенням.

2.4 Динамічний аналіз конструкції

Під час роботи на подібному оснащенні через врізання інструменту в товщу оброблюваного матеріалу виникають сили у наслідку чого виникає таке небажане явище як вібрація. Аспектами цього явище є амплітуда коливань та власне частота коливання. Так як при обробці деревини інструмент працює на досить високих обертах, діапазон вібраційних частот також розширюється. Основною метою динамічного аналізу є перевірка та експериментальний розрахунок вібраційних частот конструкції, в наслідку прикладання до неї сил різання, та частота що виникає при обробці інструментом, для уникнення такого явища як резонанс, коли ці частоти співпадали би, що призведе у наслідку до руйнування всієї конструкції. Серед методів, що дозволяють перевірити вібраційні

властивості варто відмітити модальний аналіз. Аналіз буде проведено в спеціальному програмному забезпеченні *Autodesk Inventor 2017*, рис 2.25
Схема прикладання сил співпадає, що і була використано у попередньо-му аналізі.

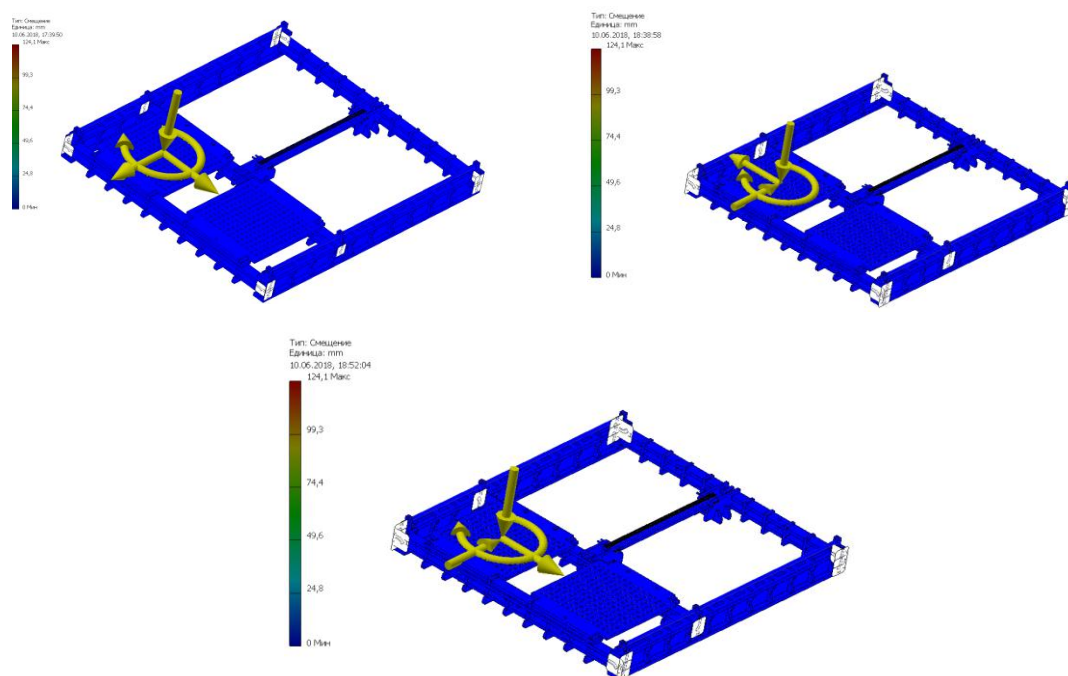


Рис.2.25 - Модальний аналіз рами

Результати аналізу показали, що ця конструкція працює в діапазоні частот від 0 до 103 Гц.

Коливний потенціал фрези, що використовується необхідно вимірювати експериментально, але опираючись на досліді спеціалістів у цій галузі варто відмітити, що коливний діапазон кінцевих фрези значно вищий та знаходиться у діапазоні від 500 до 3000 Гц, в залежності від частоти обертів та матеріалу, що оброблюється, від самого м'якої породи - сосни до твердої -дубу. Згідно цих даних можна зробити висновок, що резонансу не відбудеться.

2.5 Робочий модуль стану

На сонові аналізу побудуємо готовий робочий модуль (рис.2.26).

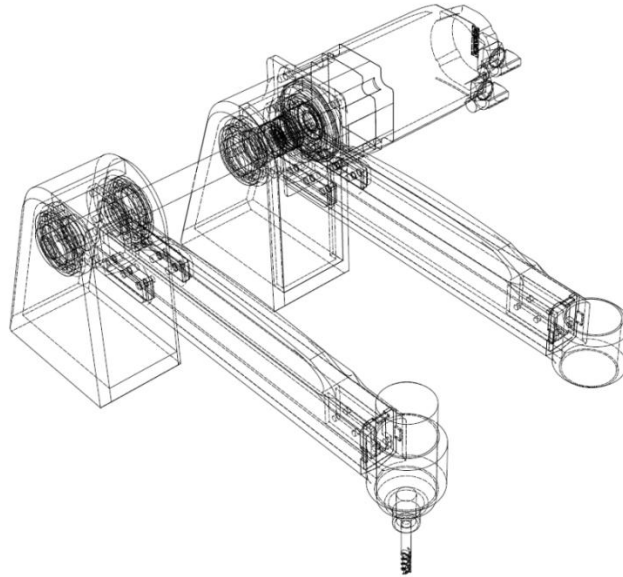


Рис.2.26 - Виконавчий модуль

Кріплення робочих плечей модуля та їх жорсткість забезпечується за рахунок використання підшипникових пар та кронштейнів. Схема кріплення вказана на рисунку 2.27

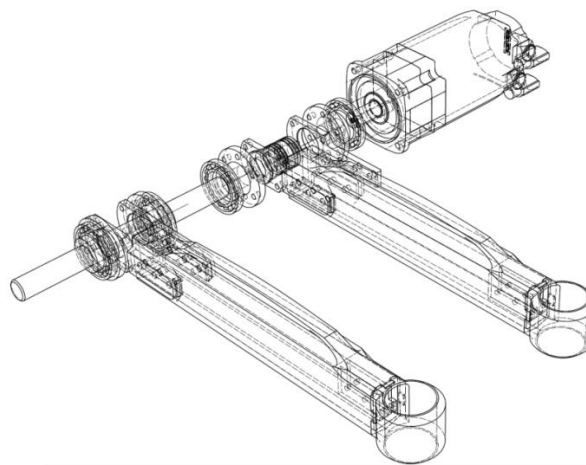


Рис.2.27 - Схема кріплення плечей виконавчого модуля

2.6 Механізм ручного керування обертанням столів

Необхідність забезпечення комфортного керування процесом обробки та комбінації двох простих рухів стану спонукає на створення вузла ручного механізму, що підвищить ергономічну здатність приладу. В умови поставленої задачі входить розробка ергономічного модуля, вузли котрого не будуть конфліктувати з автоматичної схемою зв'язку

двох робочих поверхонь. У якості забезпечення передачі руху обертання було обрано планетарну схему. Розташування механізму інтегровано в поверхню робочої плити, та не пересікається з робочими поверхнями столів(рис2.28).

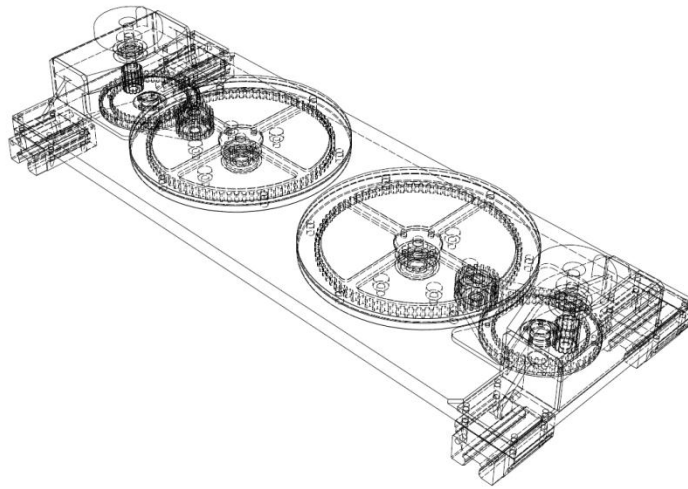


Рис.2.28 - Механізм ручного керування поворотом столів.

Два великих центральних колеса з'єднанні між собою сателітом, вісь більшого, з котрих співпадає з віссю стола. Ведуче колесо інтегровано в корпус розташований на поверхні стола, передача руху на котре, здійснюється за рахунок обертання ручки(рис.2.29).

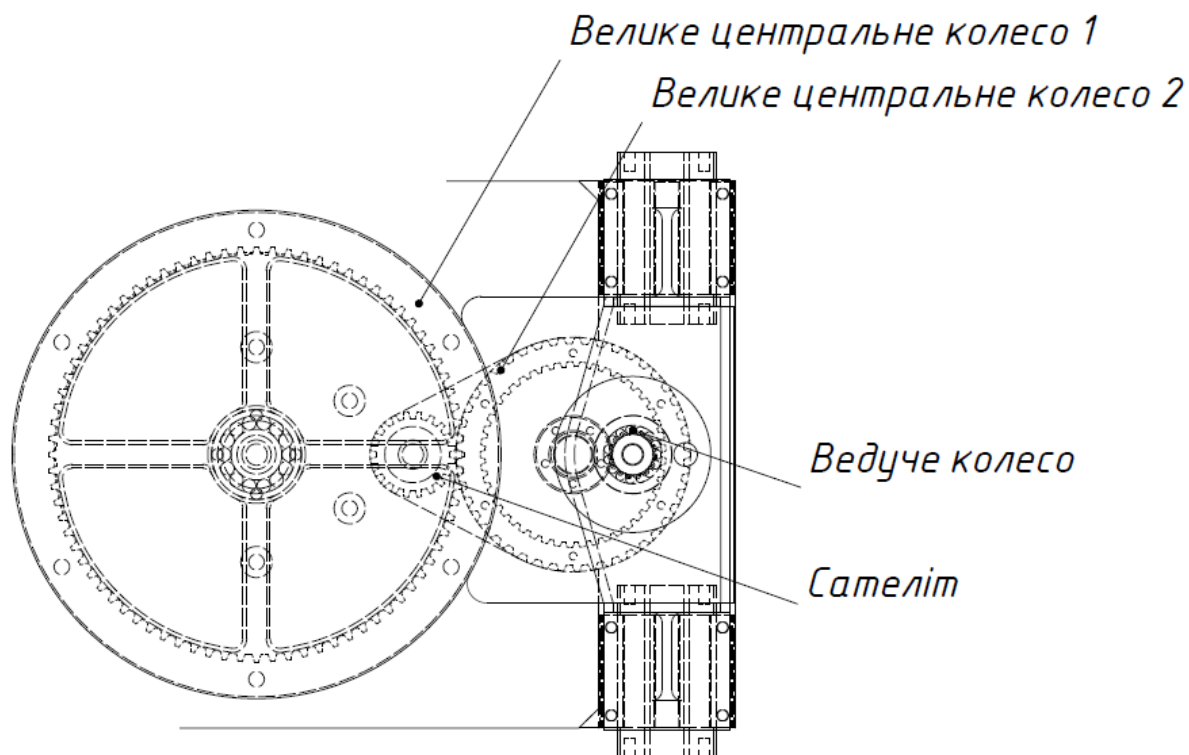


Рис.2.29 - Схема передачі руху

2.7 Лінійні направляючі та елементи переміщення робочої поверхні стенду.

Для переміщення рухомого модуля стенду, було використано та розглянуто декілька варіантів лінійних направляючих. В залежності від типу напрямних елементів обирається відповідні додаткові, що зазвичай працюють по принципу кочення по поверхні направляючої ланки, та забезпечують значне полегшення переміщення через відсутність сил тертя ковзання, що у свою чергу практично нівелює масу модуля, та його навантаженість під час роботи, що викликає зменшення навантаження на керуючий вал, через зниження величини крутного моменту. Як можна побачити з прикладів аналогів, усі виробники, котрі використовують напрямні працюють в синергії з направляючими круглого постійного січеннях[10] (рис. 2.30).

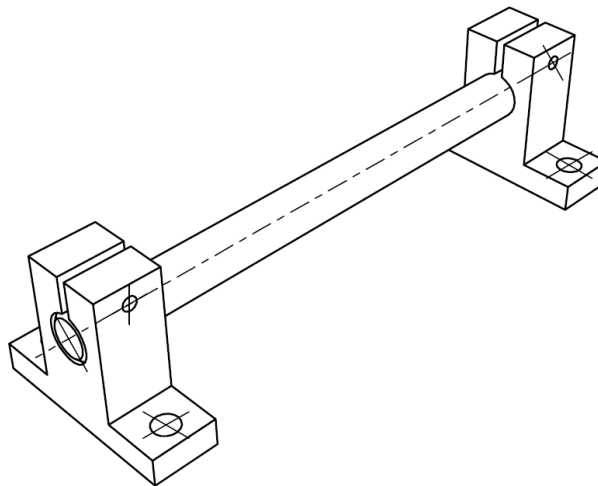


Рис. 2.30- Лінійна направляюча постійного круглого січення типу SK

Очевидним недоліком цих напрямних є відсутність великої жорсткості. Причиною цього є неможливість розташування опорних елементів у будь-якому місті корпусу верстата, що у наслідку може значно укоротити хід рейки по напрямній. Другим фактором є виникнення критичних навантажень та моментів реакцій опор, під час роботи навантаженого модулю. Для забезпечення точного осьового розміщення валу направляючої, необхідно скорегувати правильне розташування опорних елементів та забезпечити надійну фіксацію, що у свою чергу не гарантує відсутність можливості виникнення люфту.

Для уникнення цих проблем було прийнято рішення використовувати призматичні напрямні, котрі мають можливість бути закріпленні по всій довжині робочої поверхні та мають фасонний профіль, що забезпечує високу жорсткість при коченні каретки по напрямній. Тип розміру згідно самому розповсюдженому серед тих, що використовуються у подібних цілях(верстатах ЧПК, адитивний друк, тощо), - *hgrt25* (рис. 2.31).

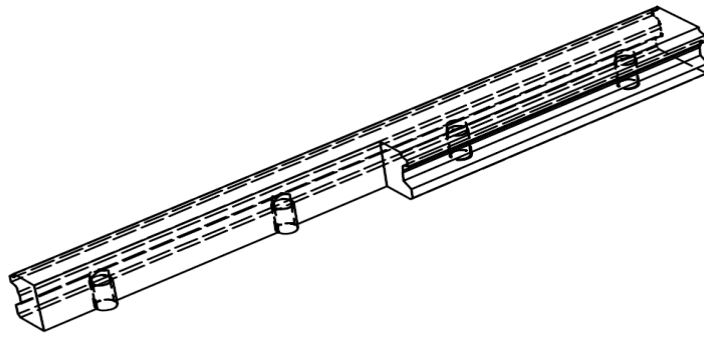


Рис.2.31 - Лінійна направляюча Hiwin(hgrrt25)[8]

Відповідно до напрямної було обрано каретку Hiwin[8] (HGW25CC) рис.2.32. Серед існуючих варіантів, що пропонує виробник дана модель є найбільш вдалою до використання в рамках приладу, через свою унікальність та великі крутні моменти, що допускаються при роботі критичних навантажень.

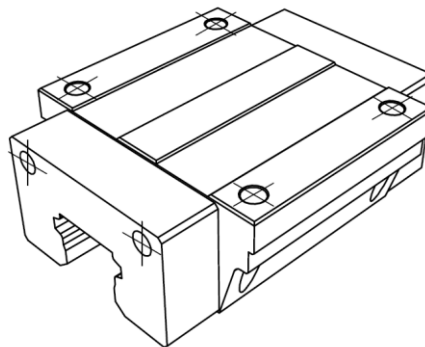
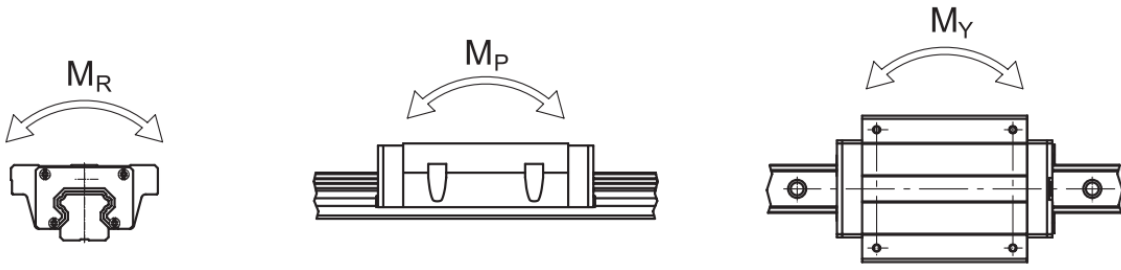


Рис.2.32 - Каретка(HGW25CC) [8]

Додаткові вилети, з розташованими на них приєднувальними отворами забезпечують можливість кріпити систему бовт-гайку, з будь-якої сторони, що досить важливо з урахуванням можливості подальшого приєднання додаткових елементів ергономіки. Моменти, що витримує дана система рейка-напрямна наведені у таблиці 2.3

Таблиця 2.3 - Допустимі крутні моменти системи HGW25CC- hgrrt25

				
Базове динамічне навантаження, кН	Базове статичне навантаження, кН	Номінальний статичний момент		
26,48	35.90	M_R , кН-м	M_P , кН-м	M_Y , кН-м
		0,35	0,35	0,35

Серед розглянутих механізмів для переміщення рухомого модуля верстата були представленні: механізм оснований на рейковій передачі, пасовій та шарико-гвинтовій передачі (ШВП). Для кожного типу механізму був розроблений первинний прототип.

Перший прототип (рис. 2.33) базувався на переміщення рухомого модуля верстату за принципом кочення вздовж ШВП. Даний прототип відрізняється від усіх інших, дуже високою точністю переміщення, та розташуванням робочих поверхонь відносно інструментарію верстата.

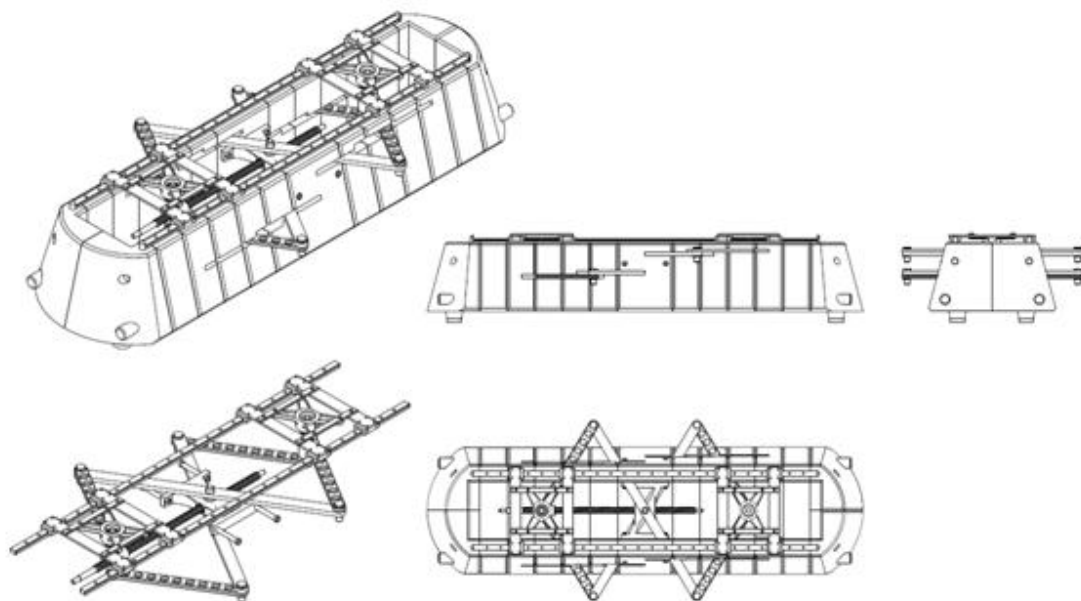


Рис.2.33 - Прототип №1, базований на русі вздовж ШВП

Принциповою концептуальною відмінністю прототипу №1 було статичне розташування інструментарію, та здійснення рухів робочих поверхонь відносно вершини інструменту та щупу у дзеркальній проекції, цей фактор зробив прототип нераціональним до подальшого завершення, через відповідне дефектування кінцевої моделі. Принцип переміщення ШВП був визнаний не зручним до використання, через відсутність можливості опрацьовувати рухи верстату у ручному режимі.

Прототип № 2(рис.2.34) був заснований на застосуванні рейкової передачі. За своїм принципом цей засіб переміщення є досить легким та компактним, що також відображається на ціні виробу. Але в умовах обробки та виниканні сил різання, рейкова передача значно програє всім іншим, через неможливість регулювати силовий параметр, так як передаточне число у всіх випадках дорівнює одиниці.

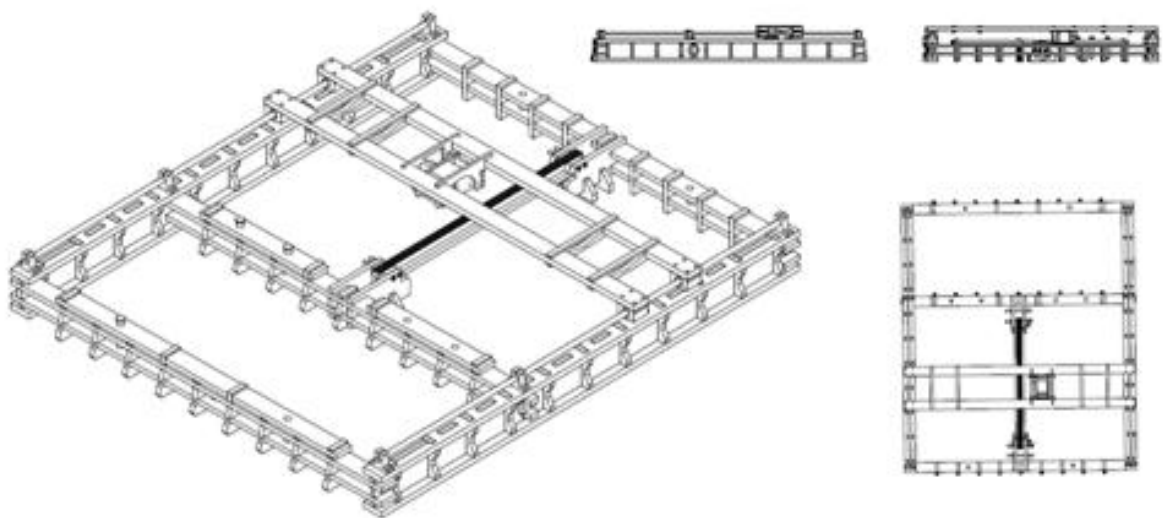


Рис.2.35 - Прототип № 3 із застосуванням рейки

Остаточним рішенням було зупинитися на варіанті з використанням пасової зубчатої передачі. Значною перевагою цієї передачі є можливість відтворювати точний поступовий рух на велику дистанцію без втрат КПД, за рахунок використання шківів з радіусним профілем, що стимулює центрування реміння при великих обертах.

Згідно аналогам настільних компактних верстатів, довжини робочого ходу в діапазоні від 1000 до 1500 мм було обрано відповідний тип ременю, - m3/m5. Для коректної роботи ременю, необхідно задати йому певний натяг. Для цих цілей використовують натягувачі. Так як до вимоги, що до руху ременя навколо зубчатого шківа, входить можливість провертатись в обидва напрямки, використання пружинних натягувачів[9](рис.2.36) не є правильним, так як через свої властивості, вони забезпечують обертання лише в одну з сторін, що визначається на етапі натягування.

Найбільш досконалим у нашому випадку є використання натяжних роликів з ексцентриковим зміщенням (рис. 2.37).

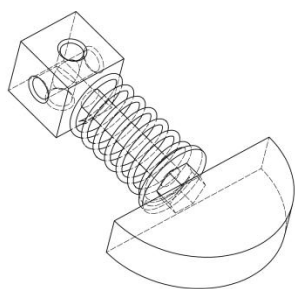


Рис.2.36 - Пружинний натягувач

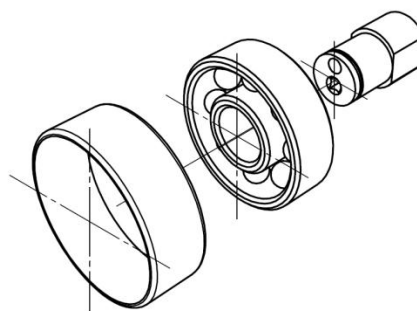


Рис.2.37 - Схема складання ексцентрикового ролика

За рахунок відсутності жорсткої осьової фіксації, ексцентриковий вал ролика займає необхідне положення в залежності від характеру руху ременя. В рамках проекту були розроблені ексцентрикові натягувачі, одного типу розміру, та інстальовані в усі механізми передачі руху з використанням пасової передачі.

Отже схема розміщення шківів та натягувачів представлена на рисунку 2.38.

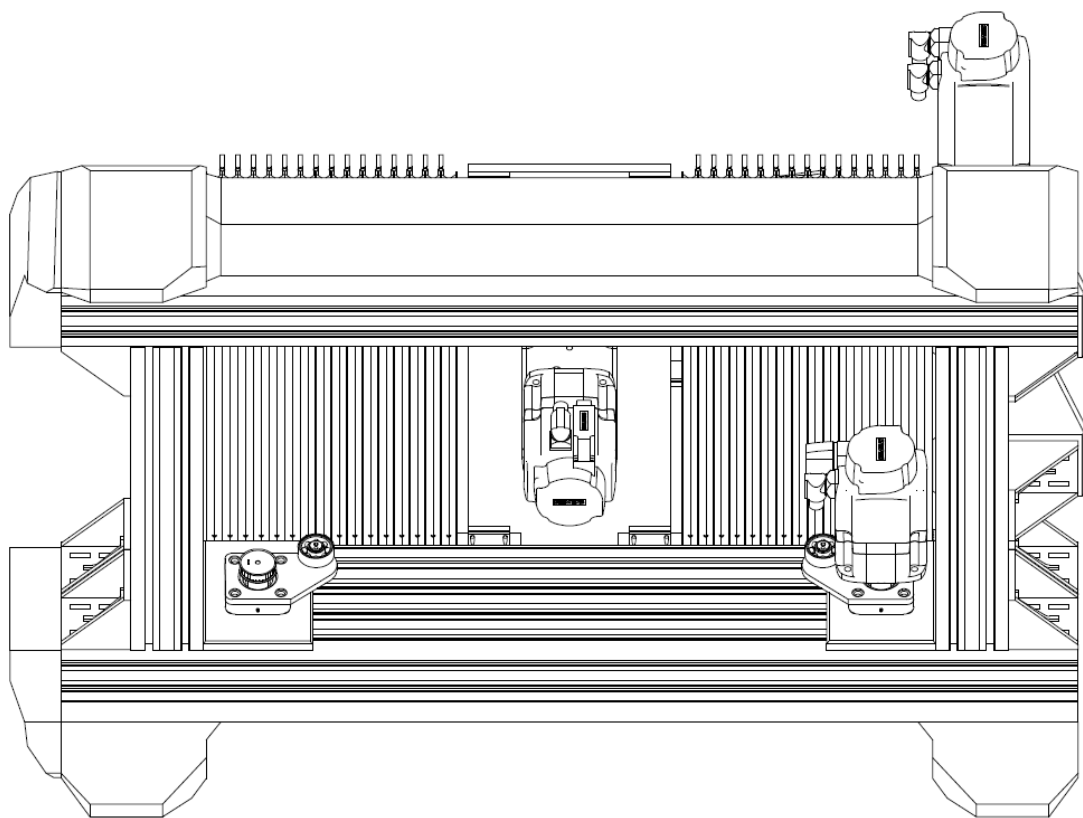


Рис.2.38 - Розміщення зубчатої пасової передачі

2.8 Розрахунок та вибір приводу головних рухів

Конструкція повинна здійснювати три головних рухи, для відтворення барельєфних поверхонь. Найбільш оптимальним, для реалізації цих рухів є використання серводвигунів[12]. Були розглянуті два їх типи. В сучасному виробництві використовуються приводи з

інкрементальним типом зчитування параметру кута та абсолютним(рис.2.39). Принципова різниця між двома цими пристроями в їх точності та дискретності. За ці властивості відповідає енкодер приладу, що відстежує кутове положення, та в залежності від кількості датчиків може дублювати заданий рух с певною точністю. В умовах експлуатації приладу важливим параметром є точність оброблення. Че-

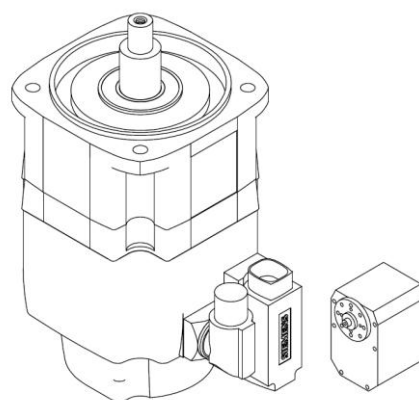


Рис.2.39 - Серводвигуни з абсолютним та інкрементальним типами енкодера

рез цей фактор було прийнято рішення використовувати приводи з абсолютним типом енкодера .

Розрахуємо параметри, що необхідні для вибору приводу у кожному вузлі приладу. Розберемо вузол, що відповідає за синхронний оберт столів навколо власної осі (рис.2.40).

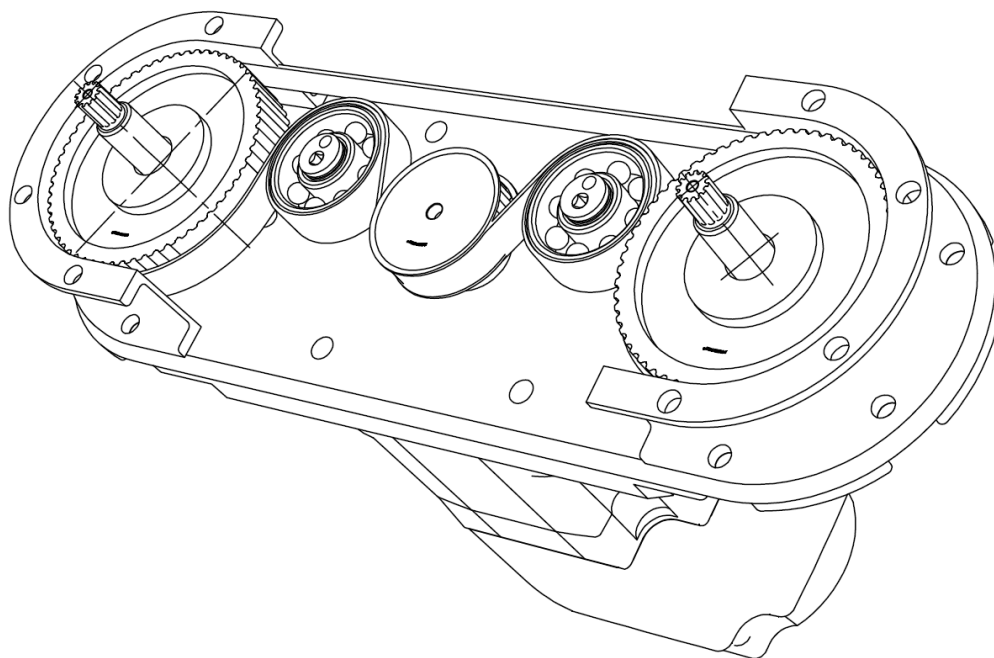


Рис.2.40 - Вузол обертання столів

Як можна побачити було вирішено використовувати пасову передачу з передаточним відношенням $1/2$, для зменшення необхідного показника крутного моменту двигуна. Отже умови, які необхідно врахувати при виборі двигуна, це сили різання, що напрямлені у площині робочих поверхонь столів. Наступною необхідною умовою є врахування критичних навантажень, що будуть виникати в крайніх точках столів та відповідати координатам кінцевого положення плеча моменту та місцем прикладання сили. Схема прикладання навантажень за рис. 2.41.

Отже при відсутності додаткової передачі та налаштування приводу під один з валів модулю, момент необхідний для синхронного обертання розраховується як:

$$M = P_y \cdot r \text{ [Нм]} \quad (2.16)$$

де P_y - сила по передній поверхні зуба фрези, r - плече моменту сил.

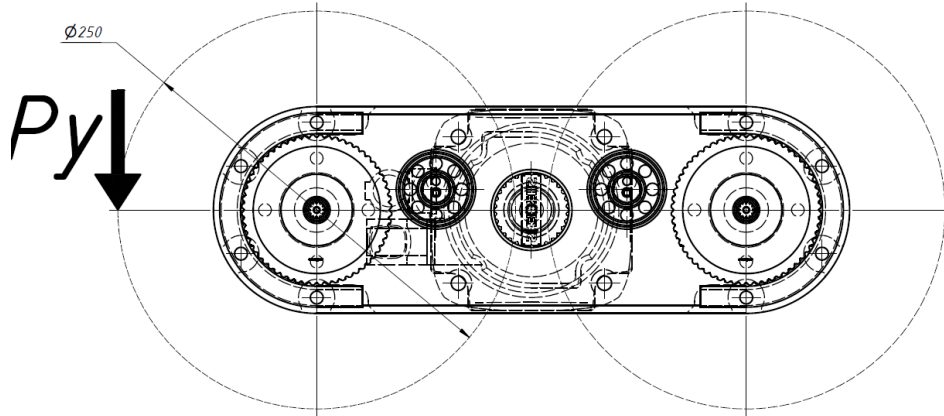


Рис. 2.41 - Схема прикладання навантажень на вузол обертання столів

Отримаємо значення без застосування передаточних відношень

$$M = 428 \cdot 0,25 \approx 107 \text{ Нм}$$

Значення є досить великим, та використання приводу, що може забезпечити прилад таким параметром, не є доцільним з конструкторської та фінансової точки зору. Скоротивши необхідне значення отримаємо:

$$M = 53.5 \text{ Нм}$$

Обираємо серводвигун Siemens 1FK7060[11] з показником моменту, $M = 60 \text{ Нм}$ рис.2.42

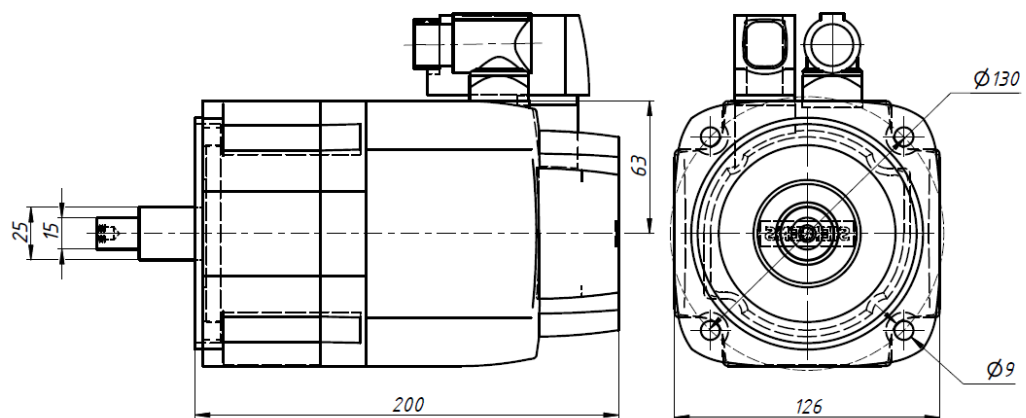


Рис.2.42 Серводвигун Siemens 1FK7060

Наступним вузлом до розглядання буде представлений той, що відповідає за лінійне переміщення модуля(рис.2.43).

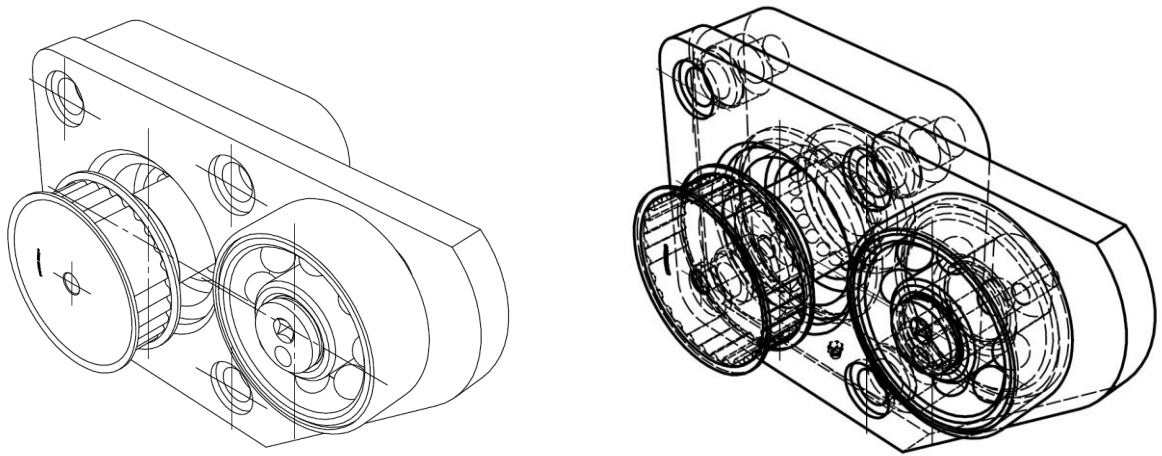


Рис.2.44 - Вузол лінійного переміщення модуля

У цьому випадку фактори, що впливають на вибір приводу, - три. Це власна вага модуля, початкове прискорення необхідне для старту та сила різання, що заважає чинити лінійний рух. Як було вказано раніше, маса модулю практично не оказує впливу на навантаження приводу через фізичні властивості кареток.

$$F_t = \frac{f}{R} \cdot N \text{ [H]} \quad (2.17)$$

де f - коефіцієнт тертя кочення;

R - радіус тіла, що котиться;

N - зусилля що діють на модуль.

Шарики, що чинять рух каретки відповідають стандарту HIWIN та становлять, $d = 3 \text{ мм}$, для HGW25CC.

До параметру N входять такі величини як власна маса та притискна сила різання.

$$N = P_z + m \quad (2.18)$$

Точкою передачі зусиль модуля на вал приводу, є зубчатий блок(рис.45), що кріпиться на ремені та власно виконує переміщення.

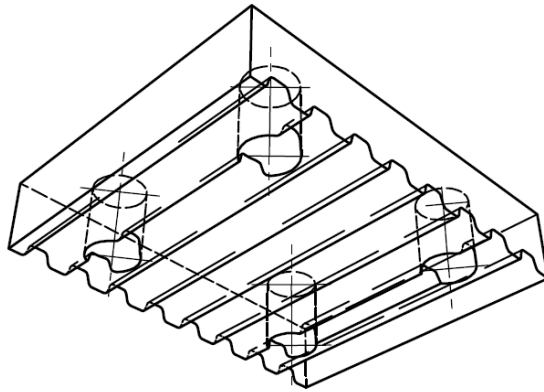


Рис.2.46 - Зубчатий блок передачі руху

У ненавантаженому стані вага модуля становить 14.5 кг, а допустима маса при робочому згідно ТЗ не повинна перевищувати 30 кг(295 Н), отже приймаємо максимальне значення. У результаті отримаємо:

$$N = 295 + 467 = 762 \text{ Н}$$

$$F_t = \frac{0.5}{3} \cdot 762 = 127 \text{ Н}$$

Сумарне зусилля, що протидіє руху модуля:

$$F_s = F_t + P_y [H] \quad (2.19)$$

Згідно схемі навантаження передачі (рис.2.47), результуючий момент дорівнює

$$M = F_s \cdot r = 555 \cdot 0.047 = 26 \text{ Нм}$$

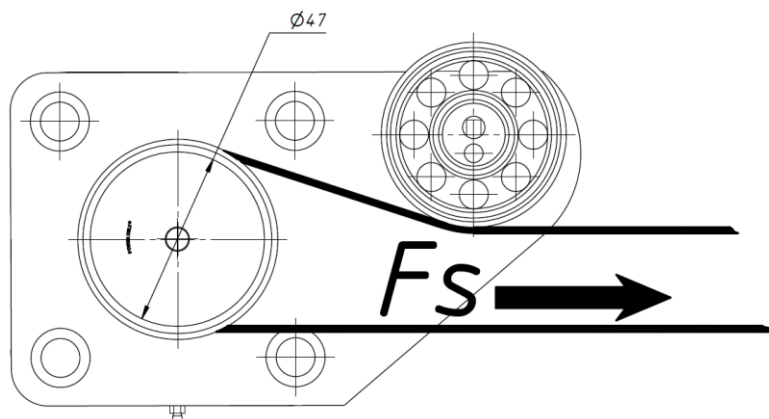


Рис.2.48 - Схема навантаження вузла для лінійного переміщення модулю

Для визначення початкового прискорення необхідно врахувати силовий фактор, що буде протидіяти конструкції під час роботи з урахуванням запасу ходу.

$$a_p = \frac{\sum F}{m} \left[\frac{M}{c^2} \right] \quad (2.20)$$

$$\sum F = F_t + P_z + 100[H] \quad (2.21)$$

$$\sum F \approx 700 \text{ H}$$

$$a_p = \frac{700}{30} = 23 \frac{M}{c^2}$$

Згідно розрахованим параметрам обираємо привід Siemens 1FK7028[11] з показником моменту, $M = 28 \text{ Нм}$ (рис.2.49).

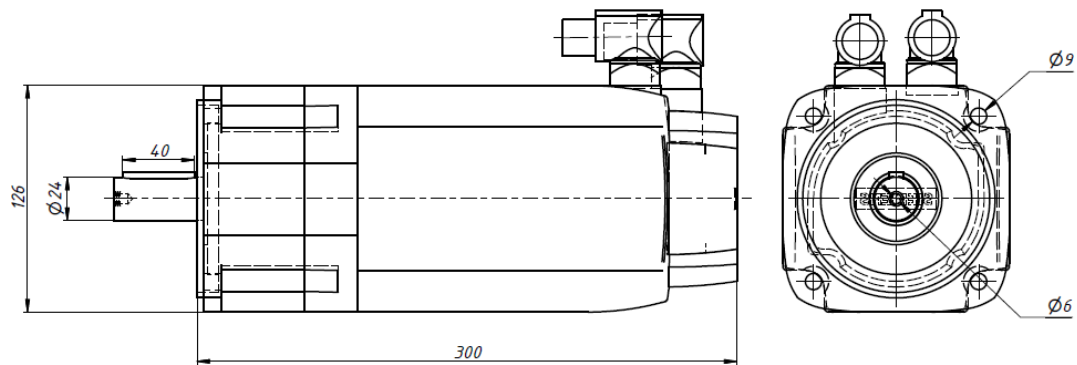


Рис.2.49 - Siemens 1FK7028

Не менш важливим вузлом, що потребує розрахунку при виборі приводу, є вузол, що відповідає за положення інструменту приладу. Схема прикладання зусиль на геометричний центр валу приводу є просторовою через розташування зусиль у різних площинах (рис.2.50). У подібних випадках результуюче зусилля є векторна сума зведених сил в точку однієї площини.

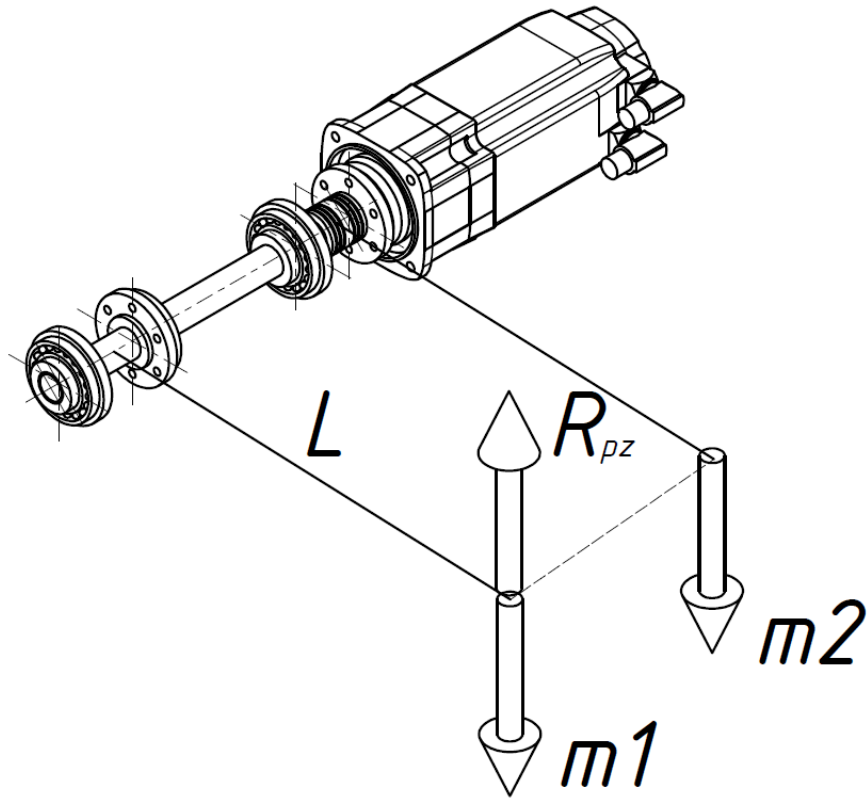


Рис.2.50 - Просторова схема прикладання зусиль

Отже отримаємо формулу:

$$M = (R_{pz} - m_1 - m_2) \cdot L \quad (2.22)$$

$$M = (467 - 125 - 104) \cdot 0.3 = 71.4 \text{ Н}$$

Для забезпечення вала подібним моментом буде використано серводвигун аналогічної геометричної конфігурації, що і попередній але з більшим показником потенційного крутного моменту, що дорівнює 75 Нм, 1FK7075.

2.9 Система захисту

Через специфіку експлуатації приладу, а саме умови обробки, виникає необхідність розробляти додаткові модулі, що будуть попереджувати виникнення аварійних ситуацій, та у деякому сенсі забезпечувати довговічність установки. Основну загрозу для механізму приладу становить продукти відходу при обробці деревини. Для уникнення подібних випадків буде використано гофру(рис.2.51).

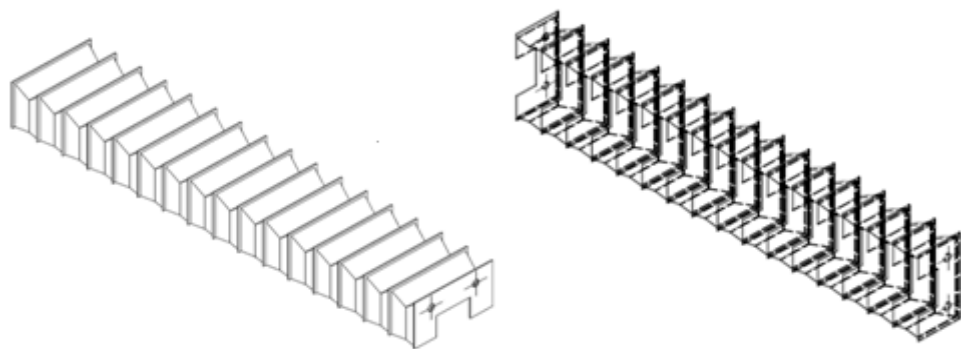


Рис.2.51 - Приклад конфігурації армованої гофри

Так як подібний елемент, як гофрована стрічка є не уніфікованим , в кожній новій конструкції можна зустріти різноманітні її конфігурації , через це, було розроблено свій індивідуальний варіант гофри. Геометричні параметри та габаритні розміри направляючої шахти гофри обираються в залежності від типу лінійних направляючих, та як наслідок елементів, що використовуються для переміщення. На цьому етапі також обирається тип кріплення. В відповідності до використаних кареток(рис.2.52) обираємо типовий для подібних елементів тип з'єднання, - болтове.

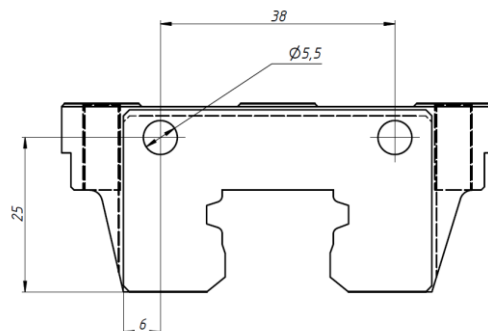


Рис.2.52 - Геометричні параметри розташування отворів рейки HGW25CC

Так як інструмент верстата працює на досить невеликій дистанції від теоретичного розташування гофри, також виникає загроза її ушкодження. У цих випадках розробляють додаткові елементи, що кріпляться до армованих ребер гофри, та мають вид пластин, що займають певне положення при розтягуванні чи стисканні шахти гофри. Ця методика досить ефективна при необхідності захисту тканини гофри, як від механічних ушкоджень, та і від стружки, що при обробці має властивість нагріватися та також становити загрозу.

Отже змодельована шахта має вигляд вказаний на рисунку 2.53, де 1, - шахта, 2 - захисні пластини

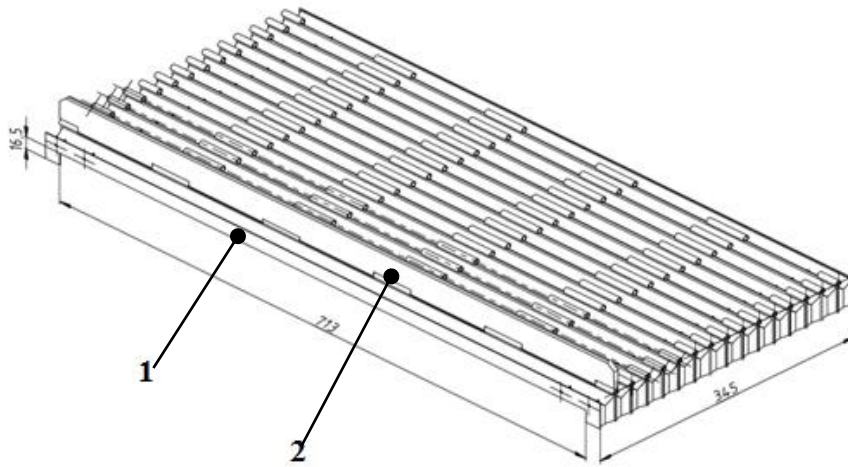


Рис. 2.54 - Кінцевий варіант конфігурації захисної системи

2.10 Топологічна оптимізація складальної одиниці

Доцільним експериментом, щодо оптимізації елементу механізму чи корпусу, є вдосконалення складальної одиниці з метою зменшення маси та кількості деталей, що у подальшому призведе до зменшенню витрат на такі ресурси як матеріал, так і обладнання для забезпечення руху модулю. Об'єктом оптимізації є складальна корпусна одиниця модуля обертання столів(рис.2.55), що складається з трьох окремих деталей. Метою оптимізації в рамках розділу є максимальне скорочення кількості одиниць та зведення тривалості процесу складання вузлів приладу до мінімального показника.

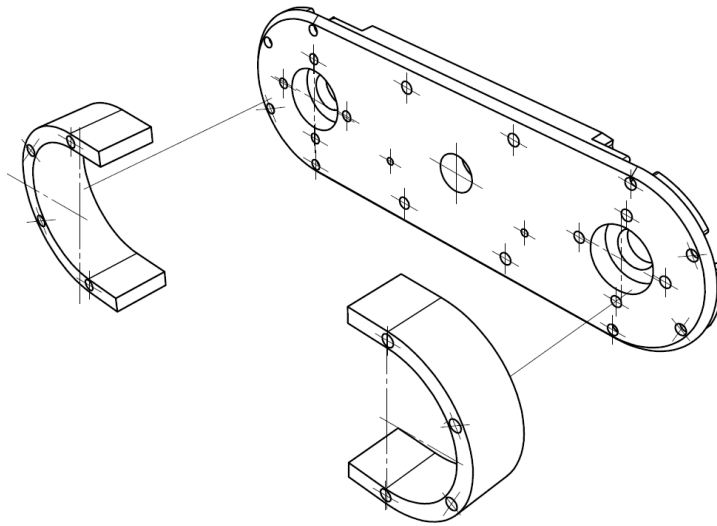


Рис.2.55 - Об'єкт оптимізації

Умова фіксації перед аналізом, враховує дійсне кріплення одиниці в робочих умовах. У якості матеріалу всім одиницям було присвоєно властивості конструкційної сталі 45. З урахуванням властивостей початковий масовий показник $m = 8,5$ кг

Схема прикладання зусиль вказана на рисунку 2.56

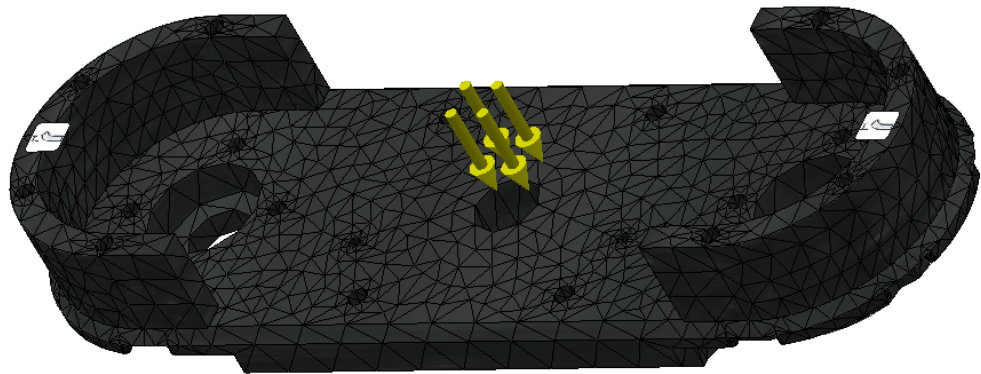


Рис.2.56 - Схема прикладання зусиль

Максимальним показником зміщення збірки є відхилення у площині розташування приєднувальних розмірів приводу та дорівнює $\Delta = 4.5 \cdot 10^{-4}$ мм (рис.2.57).

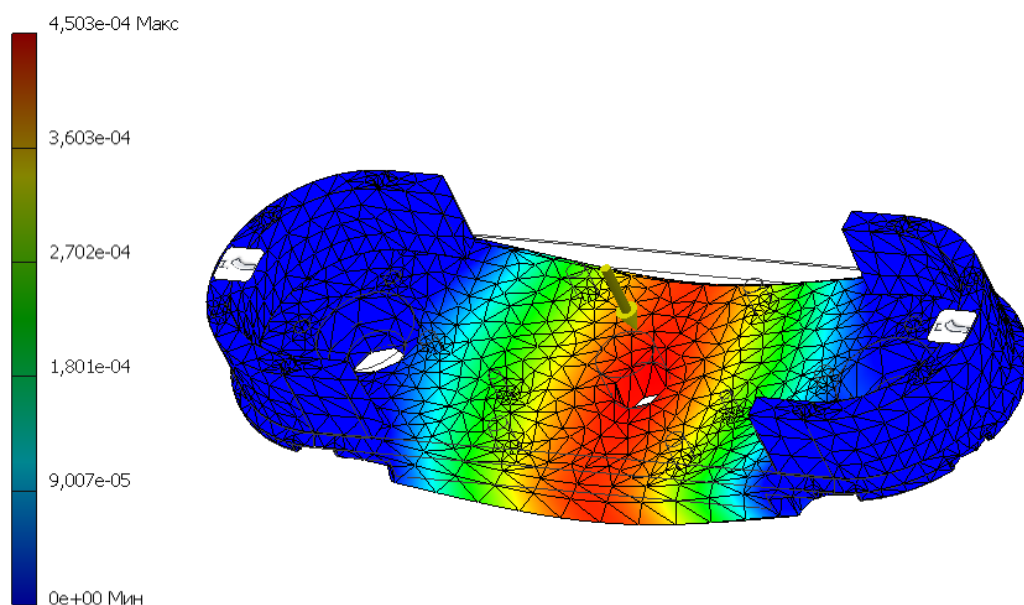


Рис. 2.57 - Результати статичного аналізу збірки

Важливою умовою перед зменшенням маси деталі є фіксація опорних елементів та уточнення геометричних властивостей деталі (рис.2.58), що не повинні змінитися після оптимізації.

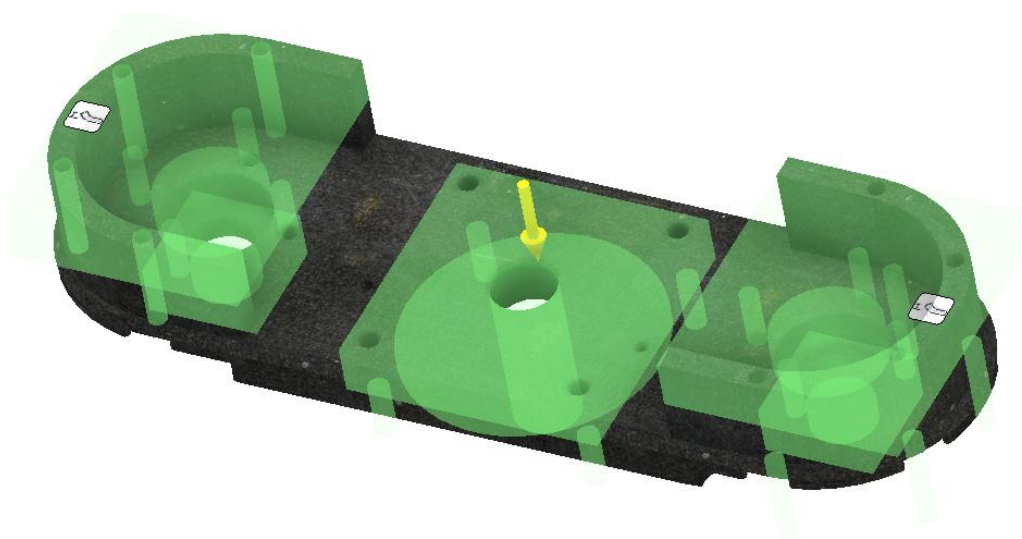


Рис. 2.58 - Ділянки, що не піддаються трансформуванню

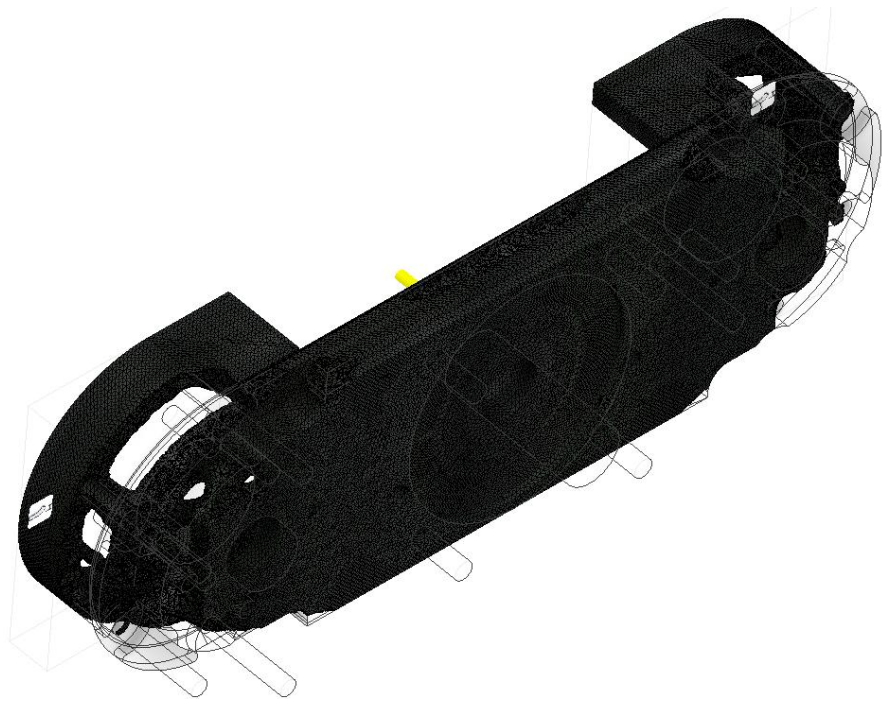


Рис.2.59 - Полігональна оптимізація

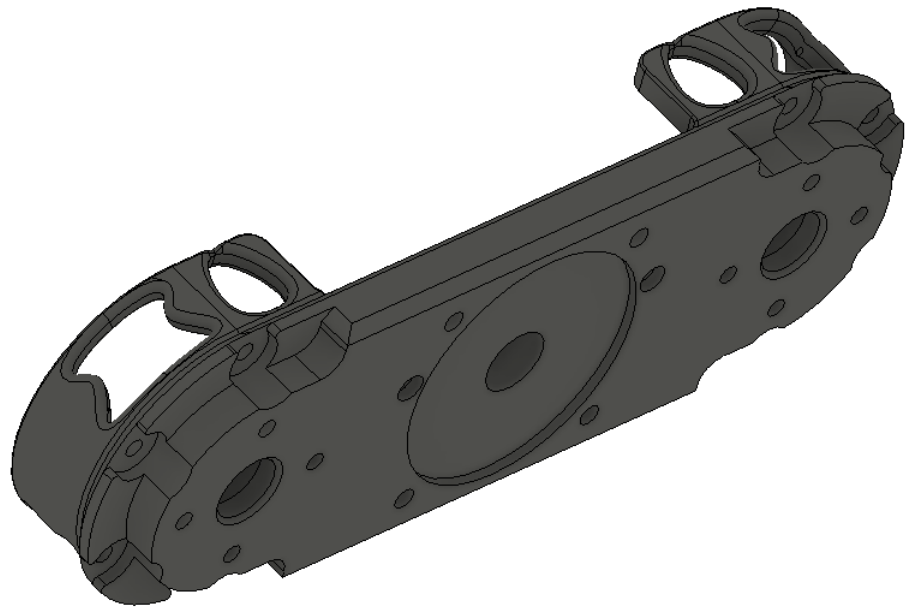


Рис.2.60 - Кінцевий результат оптимізації

Повторний аналіз конструкції виявив, що показники та напруження та зміщення змінилися у дуже незначному діапазоні $\Delta = 4.7 \cdot 10^{-4}$.

Маса виробу було зменшено на 28%. Результати аналізу представлені на рисунку 2.61.

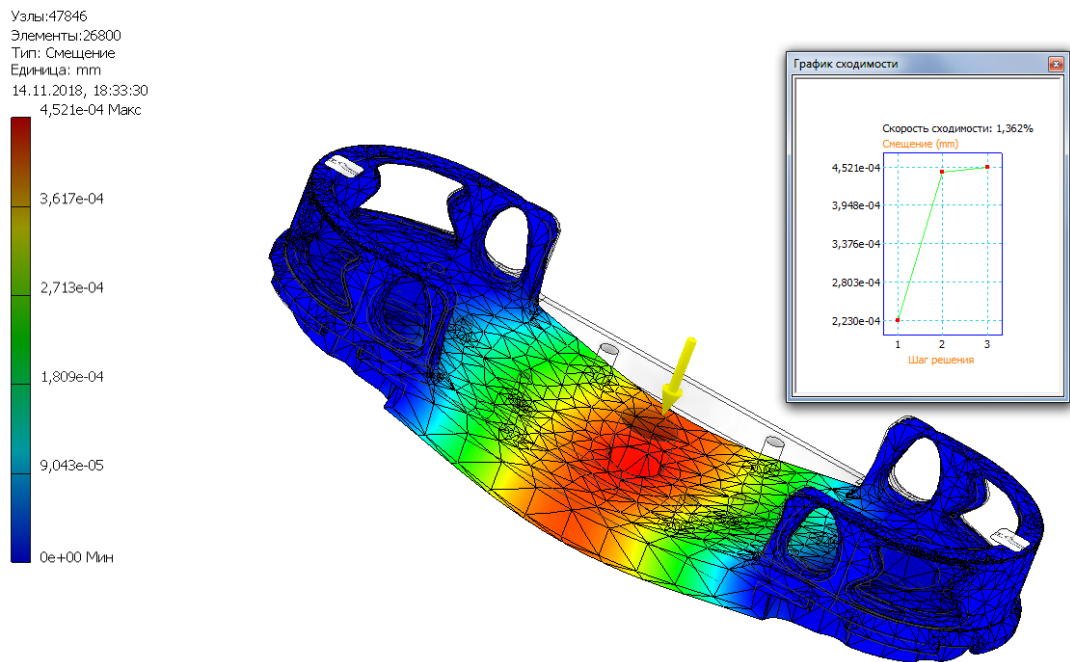


Рис.2.61 - Результаты прикладання статичного навантаження до оптимізованої деталі.

2.11 Висновки по розділу

1. Проведено три ітераційних розрахунку по пошуку уніфікованого збір-ного каркасу стенду з урахуванням комфортабельності складання та де-монтажу конструкції.
2. Прораховані силові навантаження на конструкцію та проведена симу-ляція прикладання зусиль різання на каркас, у результаті визначенні критичні зміщення елементів конструкції.
3. Визначені затрат на питому потужність приводів стенду
4. Пророблена система захисту стенду від уникнення аварійних ситуацій під час оброблення за рахунок доробки корпусних елементів гофриро-ваними елементами.
5. Виявлені та обрані потреби щодо лінійного переміщення модулів
6. Проведена оптимізація складальної одиниці стенду, з метою змен-шення загальної маси модуля переміщення та обертання столів.

ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКЕТУ ВУЗЛА СТЕНДУ

3.1 Локація інструменту

Проблема корекції положення вершини інструмента відносно вихідної поверхні деталі (ВПД), - найбільш важливе питання при обробці складних поверхонь у гібридному режимі. У наслідку порушення правил розташування, ВПД має нерівномірний показник шорсткості. Під складними поверхням на увазі мається поверхня, що може бути описана рядом нескінченної кількості логічно спрямованих сплайнів. Для спрощення задачі проблематику обробки буде розглянуто у осьовій площині інструменту.

При виборі стратегії обробки важливо врахування величини допуску $\Delta(\Pi)$ на ВПД[13]. Послідовно розташування вершини інструменту на ВПД, з урахуванням допуску, описується математично, певною кількістю точок A_i (рис.3.1), а рівномірний крок між ними відповідає величині подачі. В випадку коли обробка ведеться у напівавтоматичному режимі, доцільним є виведення розмірності подачі шляхом декількох ітерацій та послідовних наближень.

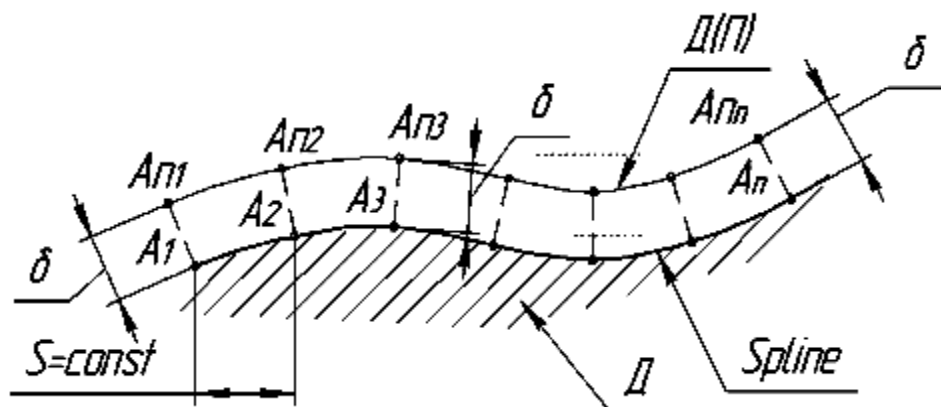


Рис.3.1 - ВПД з урахуванням допуску $\Delta(\Pi)$ [13]

Суттєвою перевагою в процесі формоутворення є відсутність необхідності профілювати складний фасонний інструмент, що за певну кіль-

кість проходів втрачає свої геометричні властивості, та потребує у наслідку або поновлення працездатності, шляхом переточування, або, як у більшості випадків, повної заміни на аналогічний. Геометричні властивості стандартного інструменту, не суттєво впливають на алгоритм вирішення стратегії обробки ВПД. Це обумовлено розташуванням всіх зон контакту у головній площині. Під зонами контакту мається на увазі зони вихідної інструментальної поверхні(ВІП) та ВПД, в результаті перетину котрих отримаємо складну геометричну поверхню. Точки, що були отримані в результаті перетину ВІП та ВПД утворюють відстань, що характеризують параметр вісі зони контакту (рис.3.2).

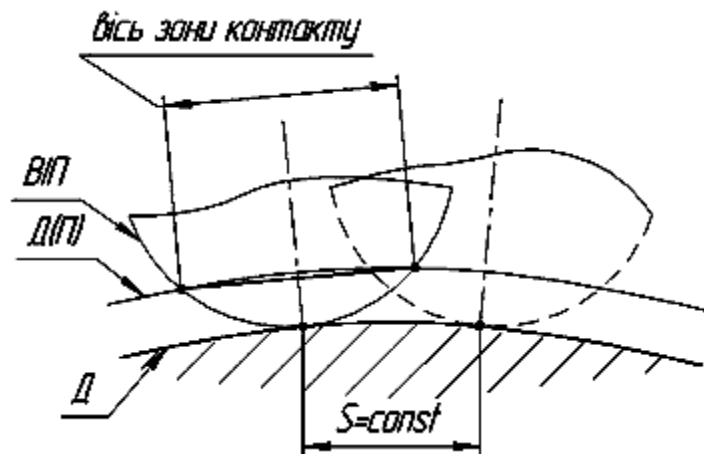


Рис.3.2 - Вісь контакту [13]

Серед можливих варіантів обробки розглядаються обробка на верстатах з 3-ьох та 5-ти осьових конфігурацій. У випадках обробки на 3-ьох координатних верстатах положення вісі інструменту завжди займає фіксоване положення та може бути чи перпендикулярним, заздалегідь виявленим шляхом апроксимації властивостей сплайну, до ВПД з урахуванням допуску, чи мати певний перманентний нахил вздовж усієї процедури обробки.

Ключовим аспектом у процесі обробки є виявлення, у будь-якій з розглянутих схем, відстані між вершиною інструменту(рис.3.3) та ВПД. У

наслідку, правильне корегування цього параметру призведе до автоматичної калібровки величини значення подачі.

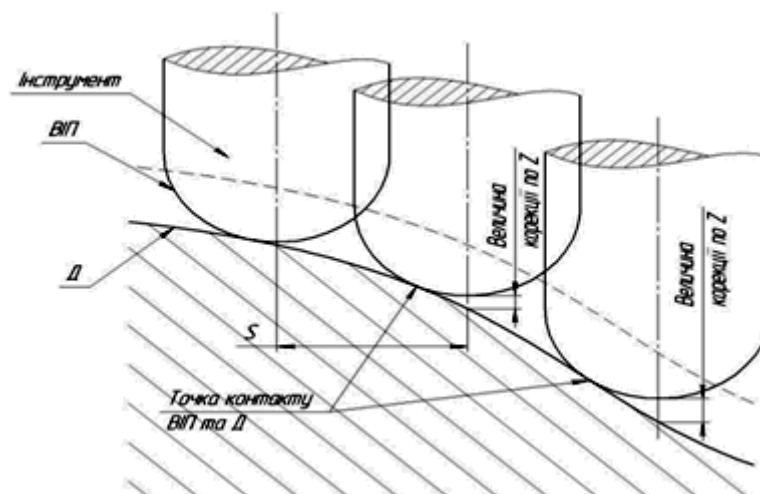


Рис. 3.3 - Схема обробки з витриманою величиною подачі. [13]

Згідно рисунку можна виявити, що величина подачі не може бути рівномірною, та у процесі обробки змінює своє значення у певному діапазоні. В результаті дотримання постійного значення подачі, ВПД отримує нерівномірний показник шорсткості, та деформується (рис.3.4).

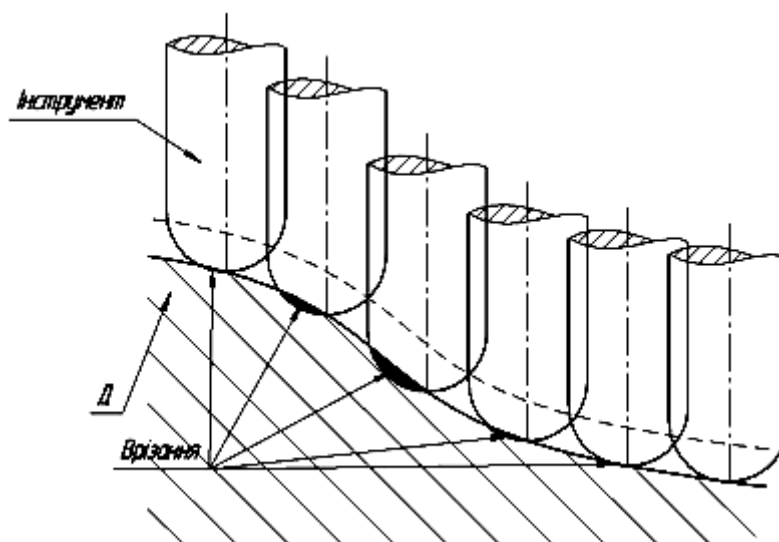


Рис.3.4 - Результат обробки сплайну при постійній подачі [13]

При обробці аналогічної поверхні на 5-ти координатному верстаті (рис.3.5) корегування положення інструмента не є доцільним, через причини описані раніше.

Стенд МТ-003 не потребує корегування навіть за відсутності додаткових двох координат, через використання вихідного твердотілого шаблону, що дозволяє уникнути врізання інструменту в ВПД.

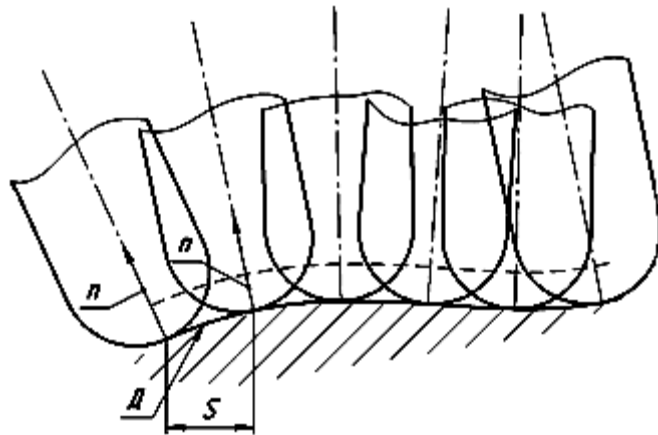


Рис.3.5 - Схема обробки на 5-ти координатному верстаті [13]

3.2 Визначення зміни кутових параметрів інструменту

Якість отриманої поверхні визначається не лише розташуванням інструменту відносно ВПД, а й величиною задніх кутів фрези, що її обробляє. Через нерівномірність геометричного профілю фрези, параметр задніх кутів змінюється, у результаті чого у обробленої поверхні виникають градієнтні властивості, щодо параметрів шорсткості.

Для визначення характеру зміни необхідно побудувати 3Д модель інструменту та дослідити кутовий параметр у січних площинах. У якості об'єкту що досліджується, було обрано сферичну кінцеву фрезу типу VF4MB корейського виробника Korloy (рис.3.6).

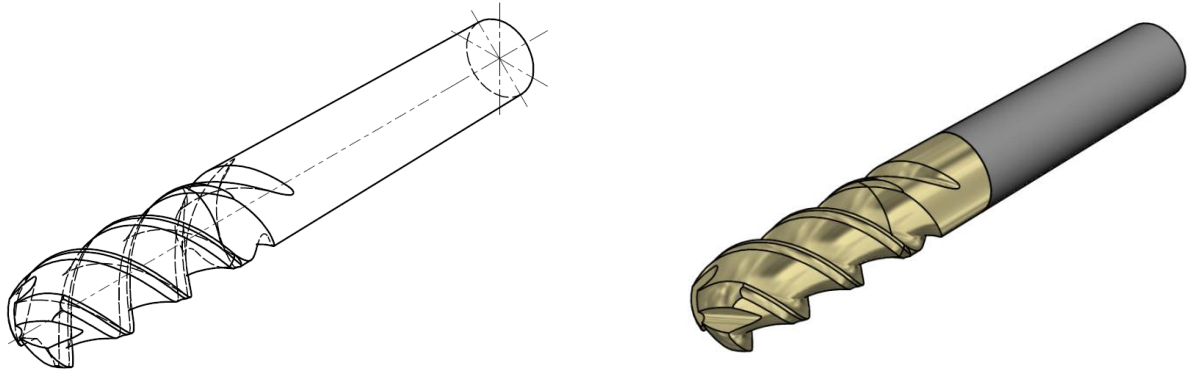


Рис. 3.6 - Кінцева фреза VF4MB

Найбільш вдалим та комфортним програмним забезпеченням до використання є продукт корпорації PTC, Creo Parametric 2.0. Це програмне забезпечення є найбільш оптимізованим серед існуючих комерційних рішень, що дозволяють зручно працювати з площинами.

Параметри інструмента становлять 30° кут нахилу різальної кромки та 20° кут нахилу заднього кута.

Шляхом застосування ітераційної апроксимації виявляємо площини в котрих буде досліджено значення заднього кута α . Площина в котрій визначається номінальне значення заднього кута є перпендикулярною до ріжучої кромки та розташована під кутом нахилу канавки.

Для чіткої констатації було вирішено дослідити три січні площини вздовж робочої поверхні фрези. Площина на ділянці без закруглення та дві площини на сферичній ділянці інструменту (рис.3.7).

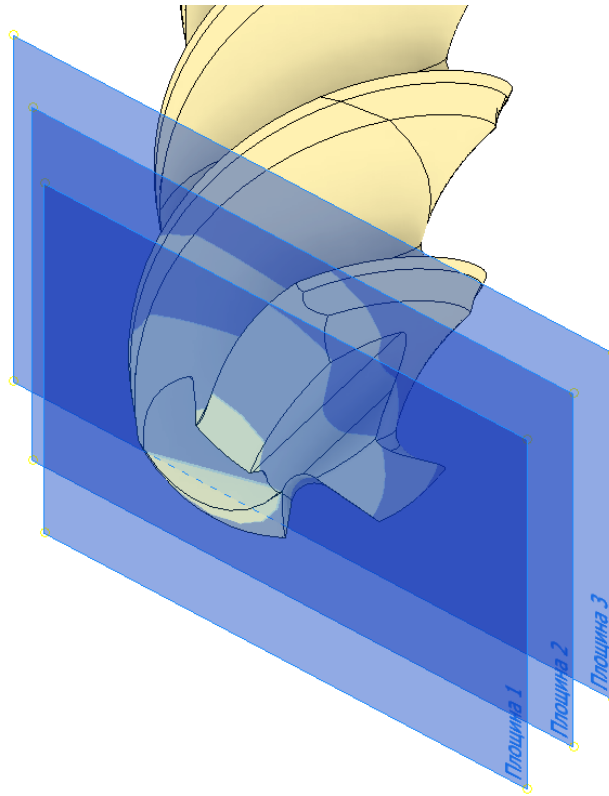


Рис.3.8 - Площини дослідження параметру заднього кута α

За умовою експерименту по мірі зростання порядкового номера площини, також збільшується відстань площини від вершини фрези. Результати досліджень вказані на рисунках 3.8 - 3.10 та таблиці 3.1.

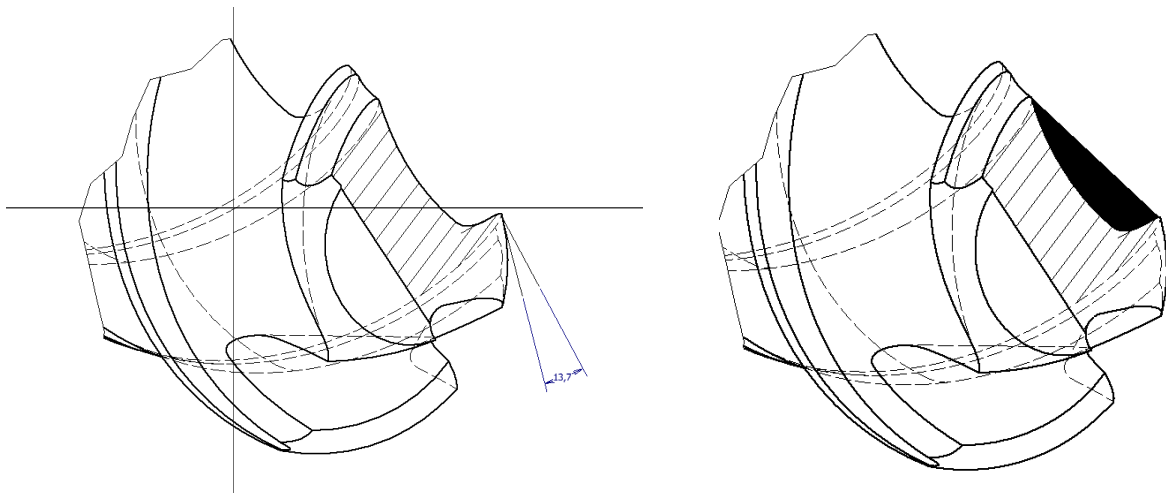


Рис.3.8 - Значення заднього кута та площі канавки, в площині 1

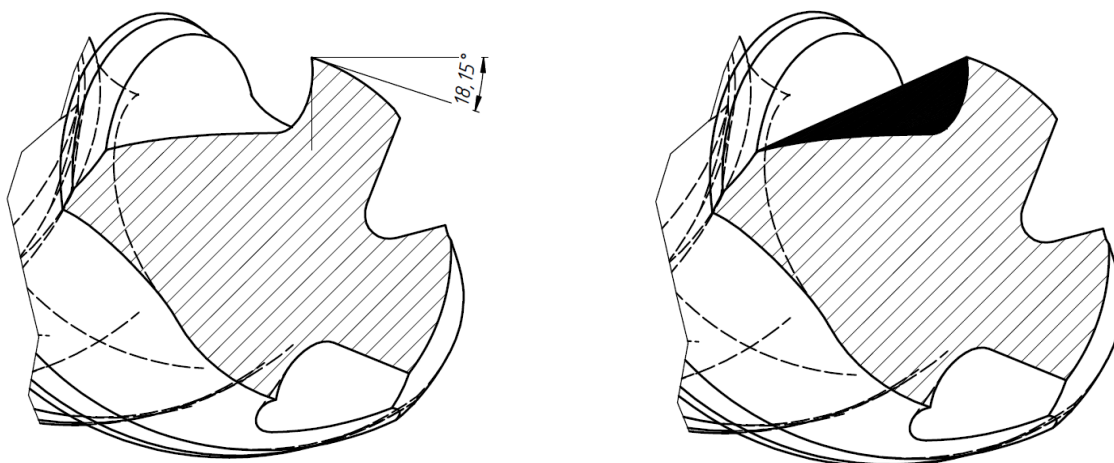


Рис.3.9 - Значення заднього кута та площі канавки, в площині 2

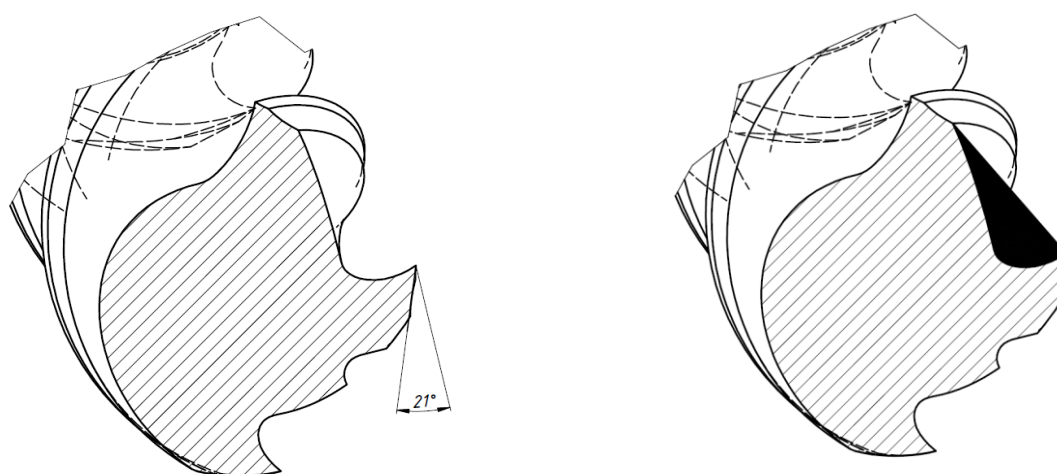


Рис.3.10 - Значення заднього кута та площі канавки, в площині 3

Таблиця 3.1 - Параметри перерізу канавки сферичної фрези

Порядковий номер площини	Значення заднього кута α	Площа перерізу канавки
1	13.7	373,05 мм ²
2	18.15	401.93 мм ²
3	21	436.897 мм ²

Згідно результатам можна зробити висновок, що по мірі наближення ВПД до вершини інструмента об'єм стружкових канавок буде зменшуватись, що негативно вплине на шорсткість обробленої поверхні.

Однак, враховуючи складну форму оброблюваної поверхні застосуванні таких фрез все ж є доцільним.

В той же час при чорновому обробленню доцільним рішенням, щодо уникнення подібних дефектів є використання фрез з постійним профілем тіла (рис.3.11).

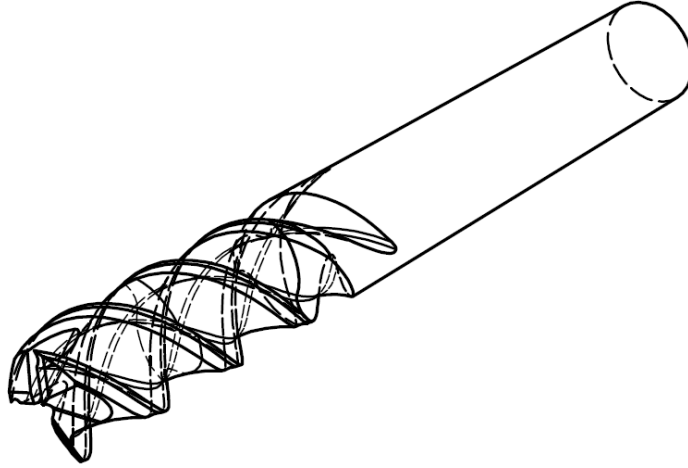


Рис.3.11 – Кінцева монолітна фреза

Такі фрези мають значну продуктивність, що є важливим на чорнових операціях, тому їх застосування буде виправданим.

3.3 Виготовлення макету вузла обертання столів

У якості об'єкту макетування доцільним рішенням, було обрати елемент приладу, бажано вузол механізму, що найбільш детально описує принцип роботи приладу та демонструє реалізацію його головних рухів(рис.3.12).

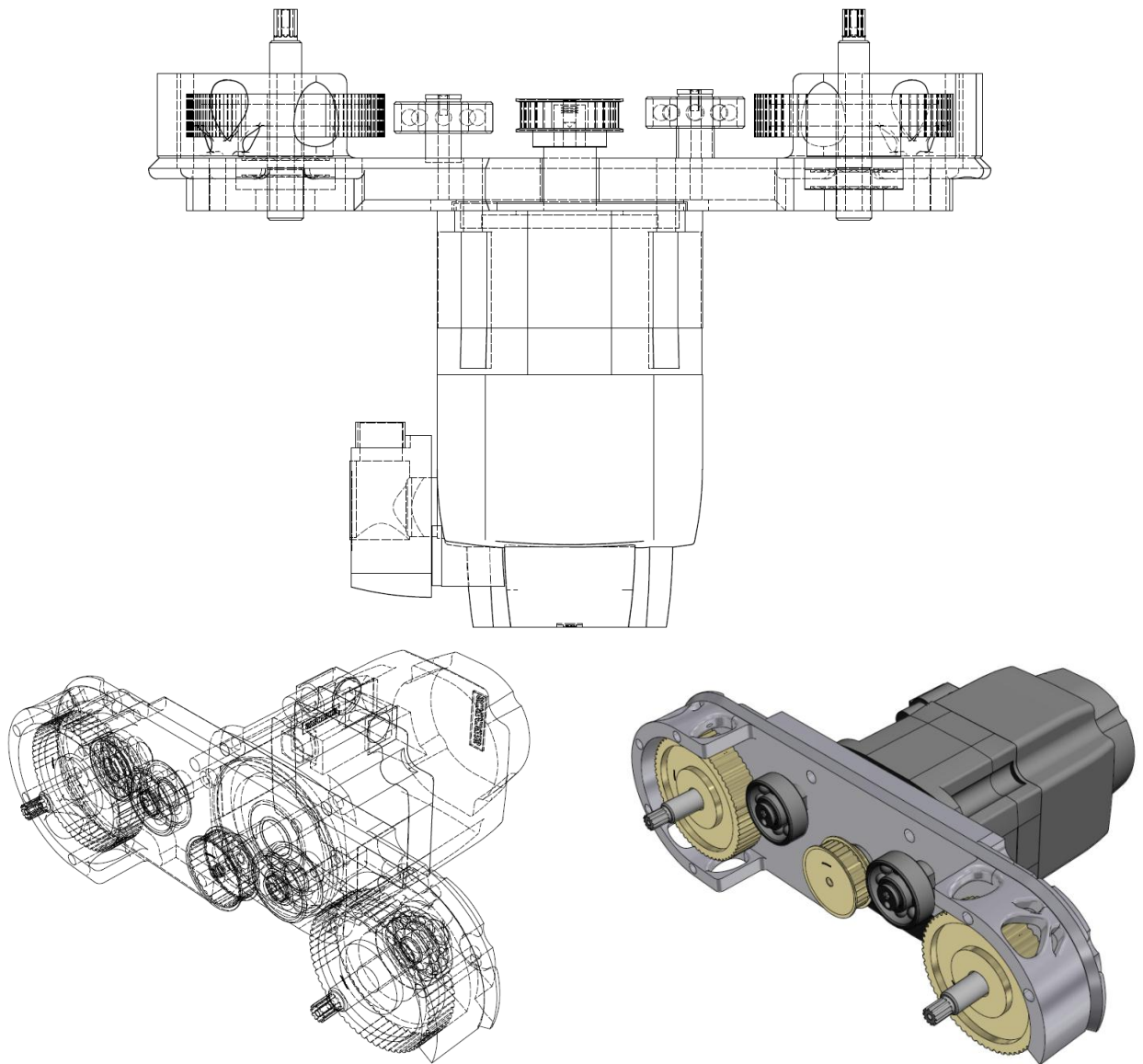


Рис.3.12 - Об'єкт макетування

В рамках дисертації, до задач макетування входить,- втілення відокремлених елементів вузла, для можливості наглядної демонстрації фіксації елементів механізму в корпусних деталях вузла. Важливою перевагою окремого макетування є доказ можливості існування вузла, як готової складальної одиниці.

3.4 Вибір технології виготовлення

У якості методу виготовлення макету було обрано застосувати сучасні адитивні технології, через можливість якісно відтворити складну геометрію елементів у досить малих масштабах. Цілеспрямовано було вирішено поділити загальну кількість деталей на дві підгрупи, для за-

стосування до кожної з них різного типу технологій, для виявлення можливостей браку та порівняння результату.

Серед обраних технологій були представлені,- технологія пошарового направлення FDM[24], та технологія по крапельного пошарового нанесення PolyJet. У першому випадку затвердіння матеріалу здійснюється шляхом окиснення, коли у другому ініціатором виступає джерело ультрафіолетового випромінювання.

Загальна кількість деталей складає , та буде виконано у масштабі 1 до 3, в порівнянні з оригіналом. Сепаровані, згідно технології, деталі до виготовлення вказані на рисунках 3.13 та 3.14

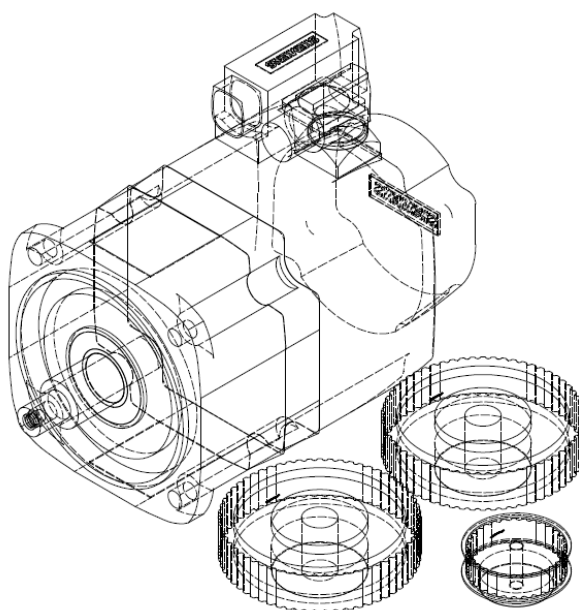


Рис.3.13 - Деталі для застосування технології FDM

Прогноз, щодо результатів друку с застосуванням FDM передбачає незначну усадку матеріалу під час виготовлення в межах від 0.1 до 0.3 мм. Через цю похибку необхідно врахувати номінальні значення всіх посадочних розмірів, а саме валів та отворів.

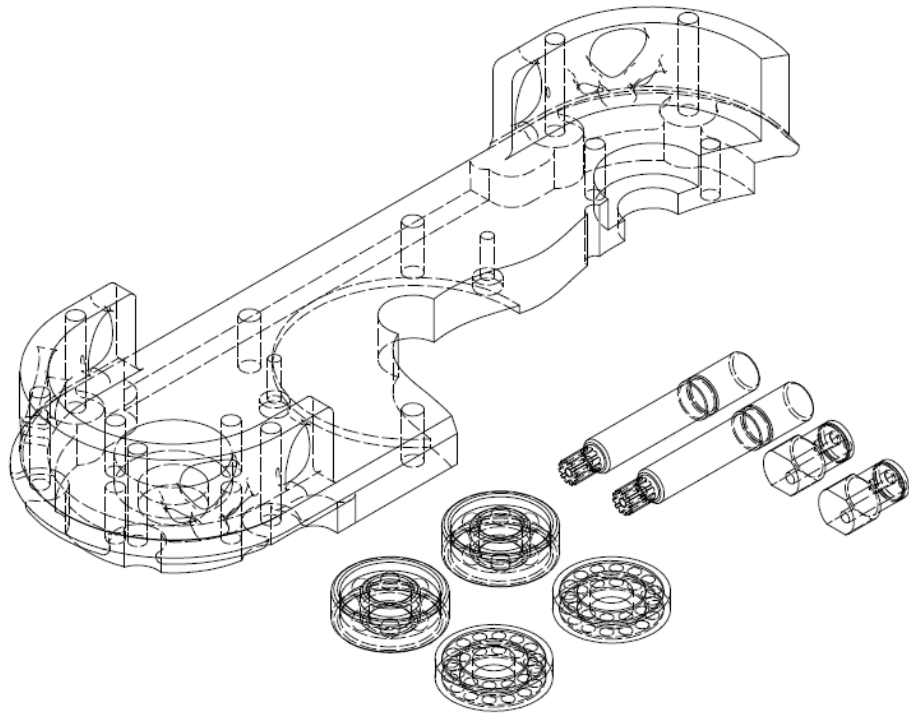


Рис.3.14 - Деталі для застосування технології PolyJet

3.5 Результат застосування FDM технології

Згідно прогнозу усадка посадочних отворів та валів не перевищує теоретичного діапазону. Результат друку вказаний на рисунку 3.15



Рис.3.15 - Результат FDM друку

Під час виготовлення виник брак пов'язаний з порушенням температурного режиму. У наслідку, - деформація торцевої поверхні моделі серводвигуна (рис.3.16).



Рис.3.16 - Дефект FDM друку

Під час підготовки моделі до конвертації в відповідний формат, було вирішено розділити модель серводвигуна на три окремі(рис.3.17), щоб підвищити оптимізацію витрат ресурсів.

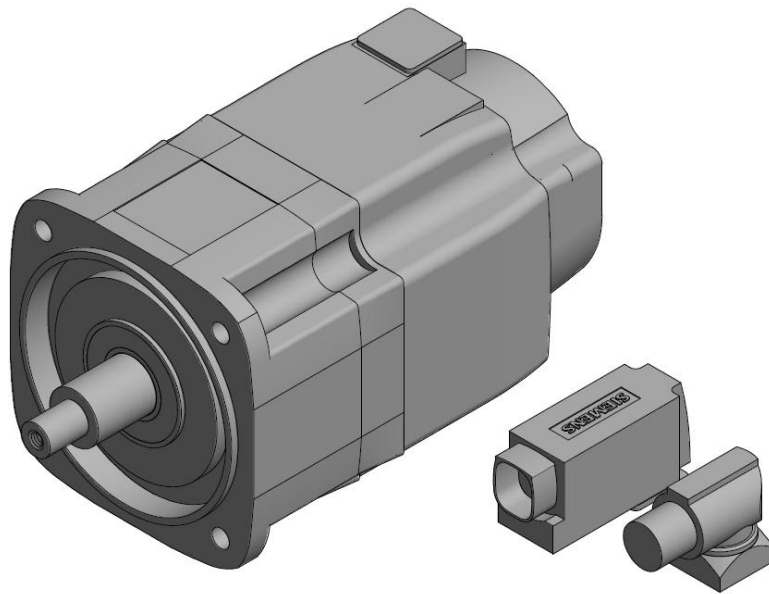


Рис.3.17 - Оптимізована сепарація фрагментів деталі

3.6 Результат застосування PolyJet друку

Polyjet вважається більш точнішим шляхом до виготовлення дрібних деталізованих моделей, через методику крапельної подачі матеріалу, та май-

же миттєву полімерізацію через використання УВ. Результат печаті вказаний на рисунку 3.18.

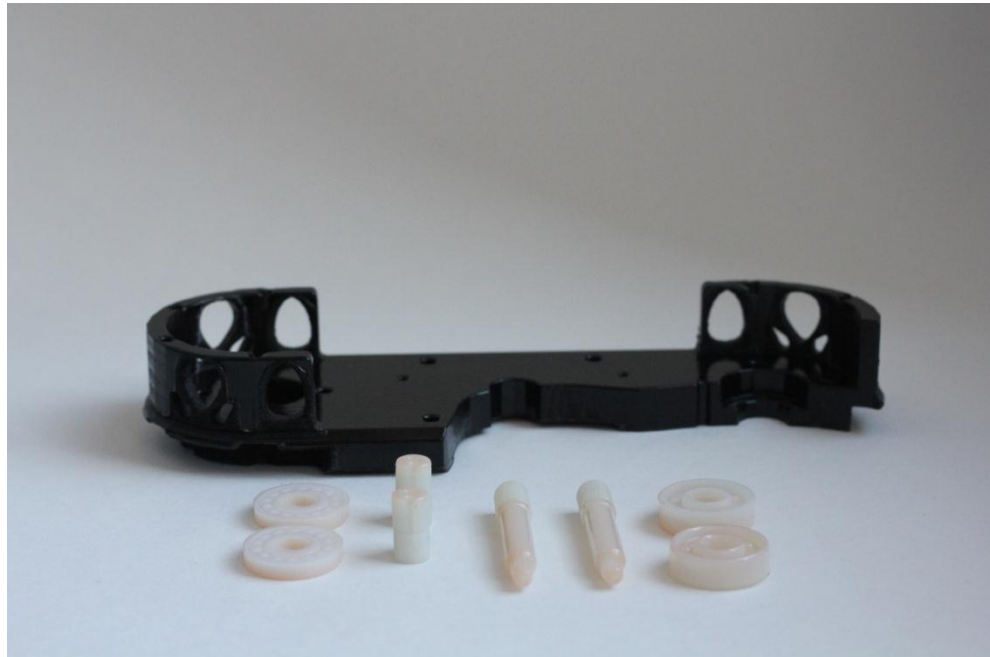


Рис. 3.18 - Результат PolyJet друку

При друці був використаний матеріал Digital ABS(ivory, veroblack). Через особливість матеріалу варіації ivory, при подовженій полімеризації, градієнтні властивості полімеру змінюються та утворюється кольоровий брак(рис.3.19)



Рис. 3.19 - Кольоровий брак при використанні ivory

Геометричний брак отриманий у разі глянцюванні поверхні на стиках та радіусних поверхонь отриманий через їх ребристість(рис.3.20)



Рис. 3.20 - Геометричний брак в наслідку глянцювання

3.7 Висновки по розділу

1. Розрахована та проілюстрована залежність зміни задніх кутів сферичного інструменту, що у подальшому вплине на якість отриманої поверхні.
2. Визначена стратегія ручної обробки барельєфних поверхонь, з урахуванням естетичної складової, що у результаті витримує залежність між величиною подачі інструменту та його геометричними властивостями.
3. Виготовлений макет вузла головного руху станку.
4. Проведена сепарація технологічного забезпечення виготовлення макету згідно передових адитивних технологій, виявлені переваги та недоліки кожної із них, обґрунтовані в свою чергу наявністю браку, що виник під час друку

СТАРТАП-ПРОЕКТ

Таблиця 4.1. – Опис ідеї стартап - проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Основою ідеєю є проектування і розроблення електромеханічного стенду для копіювання об'єктів складного профілю, в якому також буде присутня можливість запам'ятовування і повтору руху оброблення виробу.	1.Дизайн інтер'єру	Можливість оброблення будь-якого елемента декору вручну, тобто свобода дій при створенні виробу, а також використання винаходу в серійному чи одиничному виробництві. Цінова політика даного винаходу значно менша за цінову політику того ж самого верстату з ЧПК.
	2.Сувеніри	Можливість копіювання оригінального виробу та збільшення/зменшення його в розмірах. Відмінна точність готових копій.
	3.Архітектура	В даній галузі можливе виробництво копій для окремих частин того чи іншого об'єкту проектування і корегування цих копій в процесі оброблення. А коли потрібно виготовити тільки декілька копій для окремого випадку, то даний винахід безперечно є кращим за верстат з ЧПК.
	4.Деревооброблення	В даній сфері діяльності можливе універсальне використання винаходу. Більш простіша модель в використанні, в порівнянні з аналогами.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів				S	N	W
		Мій проєкт	Конкурент (товаро-замінник) 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1	Вартість	Прилад для копіювання та масштабування виробів	Верстат з чпу BZT(На прикладі модель - PFE 1500-PX BZT, Німеччина)	Дублікатор Clone 3D CD 450(Великобританія)	Gemini Carving Duplicators(США)	+	-	-
2	Експлуатація(використання)					+	-	-
3	Точність виготовлення					-	+	-
4	Функціонал					+	-	-
5	Естетика					+	-	-

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність проєкту

№	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Виготовлення корпусу дублікатора	Закупівля балок та деталей, необхідних для побудови корпусу дублікатора, та подальша обробка.	+	-
2	Комплект щупів-маршрутизаторів	Закупівля комплекту щупів для досягнення необхідної точності копії	+	+
3	Комплект фрез	Закупівля комплекту фрез для досягнення поставленої задачі при копіюванні/масштабуванні виробу	+	-
4	Серводвигун	Закупівля серводвигун у постачальника	+	-
5	Виготовлення допоміжних деталей нескладної форми	Лиття в піщану форму	+	+
6	Бокові направляючі з зажимами для плоскої різьби	Закупівля бокових регулюючих направляючих у постачальника	+	+
7	Корпус рухомого стола дублікатора (робочої зони)	Закупівля необхідного комплекту деталей, подальша обробка на верстаті з ЧПК	+	+

Таблиця 4.4. – Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показник стану ринку(найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	31
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	-
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Обмеження можуть виникати через конкуренцію та економічне становище в країні.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Технічні умови; підтвердження і дотримання стандартів Державного комітету по стандартизації, метрології та сертифікації на всіх стадіях виробництва пристрою; обов'язкова сертифікація для можливості виходу на міжнародний ринок
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	19%

Таблиця 4.5. – Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Створення точних копій виробів з дерева	Середньостатистичні приватні особи або підприємці в галузях, що тісно пов'язані з виробництвом сувенірної продукції, декору, а також в архітектурі.	Ціна на продукцію; Технічні характеристики; Загальний стан на ринку; Попит в представлених галузях; Висока експлуатаційна завантаженість.	-До продукції: якість продукції; її довговічність у використанні, стабільна робота продукції; дотримання всіх стандартів і рівня запропонованої продукції - До компанії постачальника: цілодобова підтримка; гарантія на певний термін експлуатації продукції.
2	Масштабування об'єктів			
3	Зчитування/сканування об'єкту			

Таблиця 4.6. – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Динаміка курсу національної валюти	Цей фактор в залежності від глибини і темпів змін з певною силою впливає на експортерів та імпортерів продукції.	Притаманний згасяючий вплив на компанію
2	Податковий	Впливає на витрати, рівень чистого прибутку і інші параметри діяльності підприємства	Зменшення прибутку
3	Конкурентний	Впливає на умови конкуренції, рекламну діяльність	Збільшення витрат задля конкурентної спроможності продукту
4	Рівень інфляції	Впливає на вартість ресурсів, придбаних підприємством, рівень процентних ставок по кредитах, структуру попиту на певні групи товарів.	Збільшення витрат на виробництво

Таблиця 4.7. – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Міжнародний ринок	При дотриманні всіх стандартів, сертифікацій, а також підтримки інвесторів, можливий вихід продукції на міжнародний ринок	Вихід на новий ринок призводить до збільшення обороту, виробництва продукції, якості за рахунок нової клієнтури.
2	Технологічний	Нові технологічні рішення, особливо ті, які знаходять застосування у виробництві масових товарів, сильно змінюють загальні умови підприємницької діяльності, положення на ринку або інших товаровиробників. Крім того, з'явилися і активно використовуються нові матеріали (синтетичного характеру), нові технології виробництва та задоволення потреб.	Чим гучніше є технологічні досягнення, тим глибше і масштабніше вони перетворюють економічне життя в суспільстві, ринкові відносини.

Таблиця 4.8. – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Тип конкуренції - монополістична	Конкуренція, яка має місце на ринку з багатьма продавцями і покупцями і значною кількістю реалізованих товарів за різними цінами;	Можливе складне економічне становище підприємства на початку виробництва, проте при правильному підході – значне економічне зростання.
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Оскільки основний ринок для даної продукції і її використання – є міжнародним, то і основні ставки будуть робитись саме на цьому.	Захоплення ринку на міжнародному рівні
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Охоплює декілька галузей діяльності людини (архітектура, декор, сувенірна продукція, деревооброблення, дитячі іграшки)	Збільшений попит за рахунок використання приладу в різних сферах діяльності людини.
4. Конкуренція за видами товарів – товарно родова	Конкуренція між різними видами товарів, які можуть виконувати подібні функції.	Мається на увазі конкуренція з боку товарів-субститутів (замінників). Приклад такої конкуренції - конкуренція між дублюкаторами та верстатів з ЧПК;
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Збільшення точності копіювання, багатофункціональні можливості приладу, удосконалення конструкції.	Можливий неоднозначний вплив на діяльність, оскільки, якщо продукт матиме високу цінову вартість, то попит на неї може впасти. Тому доцільно дотримуватись правил рівності ціни = якості.
6. За інтенсивністю - марочна	Оскільки даний продукт є продуктом широкого використання, то марочна політика є доцільною.	Збільшення попиту на товар, оскільки все більше і більше людей буде запам'ятовувати продукцію і компанію за її маркою.

Таблиця 4.9. – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Виробник пристроїв для копіювання - Clone duplicators(Великобританія)	Виробник, що займається розробкою та виготовленням верстатів з ЧПК - BZT(Німеччина),	Виробник серводвигунів - <u>Spring Model Electronics</u>	Зменшення ціни виробу та збільшення функціональності	Прогресивне виробництво верстатів з ЧПК
Висновки:	Удосконалення конструкції, простоти у використанні та збільшення функціональних можливостей	В даному випадку основним критерієм конкуренції є цінова політика	Умови як і для всіх інших клієнтів. Можлива зміна ціни на необхідне обладнання через економічне становище.	Можливість проведення робіт по зменшенню собівартості приладу та підґрунтя для удосконалення приладу	Складність конкурувати в точності даного виду копіювальних пристроїв

Таблиця 4.10. – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Вартість	Ціна-якість-функціонал відповідають один одному і є значно дешевшими порівняно з аналогами, представленими на ринку.
2	Експлуатація(використання)	В порівнянні з верстатами – значна економія при експлуатації техніки за рахунок напівавтоматичної чи просто механічної роботи пристрою, а в порівнянні з дублюкаторами значних відмінностей немає.
3	Точність виготовлення	Збільшена точність копіювання об'єкту за рахунок удосконалення конструкції і можливість коригування майстром в процесі оброблення виробу. Проте в порівнянні з верстатами ЧПК точність можлива дещо гірша.
4	Функціонал	Більше можливостей при коректуванні виробу за рахунок ручного управління в порівнянні з верстатами ЧПК, можливість зміни розміру виробу при копіюванні, багатократне копіювання. Вивід стружки непотрібного матеріалу з робочої зони за рахунок пневматики. Зчитування і повторення рухів за рахунок встановленого пристрою для зчитування інформації з об'єкту.
5	Естетика	Можливість коректування виробу і можливість повної свободи дій майстра над виробом і його видозміною.

Таблиця 4.11. – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «пристрою для копіювання»

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали(1-20)	Рейтинг товару виробника «Clone duplicators»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Вартість	10	+						
2	Експлуатація	12		+					
3	Точність виготовлення	9							+
4	Функціонал	15				+			
5	Естетика	18	-						

Таблиця 4.12. – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Простота використання; вартість; висока естетична складова, відсутність високих вимог щодо матеріалу виготовлення	Слабкі сторони: складність обслуговування, вібрації
Можливості: Можливість презентації роботи пристрою навіть з неповною комплектацією, залучення науково-дослідних інститутів	Загрози: впровадження у рамках одиничного виробництва, плагіат, пошук інвестицій

Таблиця 4.13. – SWOT-аналіз стартап-проекту

№	Альтернатива(орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів, %	Строки реалізації, місяців
1	Верстат з ЧПК	50	12
2	Існуючі дублікатори	50	18
3	Універсальні верстати	35	13

Таблиця 4.14. – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживача прийняти продукт, %	Орієнтований попит в межах цільової групи, комплектів/рік	Інтенсивність конкуренції в сегменті, %	Простота входу у сегмент, %
1.	Підприємства виробники меблів, та виробів з деревини	75	200	60	70
2	Підприємства виробники елементів	80	400	65	85

	<i>декору та їх інсталяції</i>				
3	Підприємства іграшкової промисловості	50	100	40	30
4	Підприємства що займаються обробкою каменю, та інших гірських порід	30	600	80	40

Таблиця 4.15.–Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Станок з ЧПК	Вибіркова	Габарити, вартість, естетика, легкість використання	Стратегія комбінування

Таблиця 4.16.–Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Чи є проект "першопрохідцем" на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих конкурентів	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Так	Ні	Пристосовницький тип стратегії

Таблиця 4.17.–Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Вартість	Стратегія комбінування	+	+
2	Легкість використання		+	+/-
3	Велика функціональність		-	+
4	Естетична складова		+	+
5	Точність виготовлення		+/-	+

Таблиця 4.18.– Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами(існуючи або які потрібно створити)
1	Вартість	Загальна вартість продукту	Використання нескладних компонентів для виготовлення пристрою
2	Легкість використання	Відсутність наявності потреби умінь володіння складним обладнанням	Використання нескладних технологій не потребуючих глибоко розуміння процесу обробки
3	Велика функціональність	Великий набір інструментів щодо рішення складних задач	Комбінування сучасного інструменту та надання йому та заготовці високої ступені вільності
4	Естетична складова	Втручання людини у процес обробки	Використання людського фактору у процесі обробки
5	Точність виготовлення		Комбінування автоматичного та механічного керування процесом

Таблиця 4.19.- Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Рівні товару	Сутність та складові	
1.Товар за задумом	Простий,дешевий пристрій з можливістю дублювання та виробів з високою естетичною складовою.	
2.Товар у реальному виконанні	Властивості характеристики	
	1. Вартість 2.Легкість використання 3.Велика функціональність 4.Естетична складова 5.Точність виготовлення	

Таблиця 4.20. – Визначення меж встановлення цін.

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи	Верхня та нижня межа встановлення ціни на товар
1	1000	100	-	100-1000

Таблиця 4.21. – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функція збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Поступове	Безпосередньо продаж продукції та окремих її компонентів, консультація, налагодження контактів щодо сервісу обслуговування.	Нульовий Рівень каналу	Вертикальна корпоративна система

Таблиця 4.22. – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікації, якими користується клієнт	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Вимоги щодо зручності використання, надійності конструкції та якості кінцевого продукту	Веб-сторінка, консультація клієнта в онлайн режимі, Демонстрація роботи у соц-мережах	Якість, вартість, висока естетична складова кінцевих продуктів, легкість використання	Максимально інформативно донести до аудиторії, суть продукту з використанням простих схем, графіків та малюнків.	Ви ще не придбали дубліката, то ми йдемо до Вас!

4.1 Висновки

За результатами проведеного стартап-проекту можливо стверджувати, що запропонована конструкція та ідеї її втілення мають широкий попит на сучасному ринку послуг України.

Список використаної літератури

1. Leaflet Wiwamac Copying Machines [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. Режим доступу <https://wivamac.com/> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
2. Duplicarver [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <http://www.duplicarver.ru/catalog/> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
3. Hybridpantourer [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <https://hybridpantorouter.com/> // (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
4. Jettools [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <https://www.jettools.com.ua/derevoobrabotka/frezernye-stanki/index.html> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
5. УГЛТУ, И.Т.Глебов - "Обработка Древесины Методом Фрезерования" Екатеринбург 2007г, 138-280 с.
6. Фрезерование по дереву [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <http://frezycnc.in.ua/page/833096> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
7. Rexroth Bosh Group "Базовые механические элементы" [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <https://www.boschrexroth.com/en/xc/industries/machinery-applications-and-engineering/engines/engines-7> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
8. Hiwin "Motion Control Linear HG system" catalog " [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <https://www.hiwin.com/linear-guideways.html> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.

9. Корпорація PowerBelt " [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <http://powerbelt.com.ua/category/EKSZIJTARCSAK> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
10. PowerBelt " [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <http://powerbelt.com.ua/category/SZIJFESZITOK> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
11. Siemens [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу http://www.comsol.ru/katalog/privodnaya_tehnika/siemens/kat/d31.pdf (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
12. Siemens [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу <https://www.siemens-ru.com/taxonomy/term/129> (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
13. Солодкий В.І, Глоба О.В - "Моделювання процесів формоутворення"
14. Autodesk [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу autodesk_support.com (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
15. РТС [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. - Режим доступу RTS-Creo_support.com (Дата звернення 10.09.2018) - Назва з екрана.
16. Ковалёва Н.В. Наталюткина И.А. Силовой расчёт и механизмы станочных приспособлений : Издательство «Дружковка», 2007. – 32 с.
17. Солодкий В.І- "Утворення фасонних поверхонь циліндричним тілом" КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна.
18. Фельдштейн Н.Э. Режущий инструмент: учеб. пособие / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич, М.И. Михайлов. – Минск: Новое знание, 2007. – 400 с. ISBN 978-985-475-250-1
19. Ординарцев И.А., Филиппов Г.В., Шевченко А.Н. Справочник инструментальщика: Учебник. – К.: Вища шк., 1987. – 347 с.
20. ГОСТ 18475-82. Трубы холодно деформируемые из алюминия и алюминиевых сплавов.
21. Инженерный справочник [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу <https://www.dpva.ru/Guide/GuideTricks/PressureLoss/LambdaHydraulik/> (дата звернення 05.12.2018) – Назва з екрана

22. САПР аналитика[Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу<https://sapr.ru/article/20602>(дата звернення 05.12.2018) – Назва з екрана
23. А.В. Пузанов "Инженерный анализ в Autodesk simulation Multiphysics", ДМК, Москва 2013.
24. Костище Є.С, Солодкий В.І, доц, к.т.н, "Топологічна оптимізація в рамках адитивних технологій"

Додаток А" Партнерська пропозиція"

Додаток Б " Слайди презентації"